

Universidade de Lisboa  
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Avaliação de novas plataformas de deteção remota para monitorização de  
lagoas termocársicas (subártico canadiano)**

**Pedro António Faria Freitas**

Dissertação orientada  
pelo Prof. Doutor Gonçalo Vieira e Prof. Doutor Warwick Vincent

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao  
Ordenamento

2018





**Avaliação de novas plataformas de deteção remota para monitorização de lagoas termocársicas (subártico canadiano)**

**Pedro António Faria Freitas**

Dissertação orientada  
pelo Prof. Doutor Gonçalo Vieira e Prof. Doutor Warwick Vincent

Júri:

Presidente: Professor Doutor Fernando Jorge Pedro da Silva Pinto da Rocha –  
Professor Auxiliar do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da  
Universidade de Lisboa;

Vogais:

- Professor Doutor Pedro Berardo Pina – Investigador Principal do CERENA – Centro de Recursos Naturais e Ambiente do Instituto Superior Técnico;
- Professor Doutor João Canário – Investigador Principal no Centro de Química Estrutural do Instituto Superior Técnico;
- Professor Doutor Gonçalo Brito Guapo Teles Vieira – Professor Associado do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa





*À fonte da minha vida e ao amor eterno:*

*À Graça, ao Rui, à Adriana e ao Tiago*



# RESUMO

A leste da Baía de Hudson, no Subártico Canadano, têm sido registadas alterações ao nível do equilíbrio térmico da camada ativa e do *permafrost*, bem como nos ecossistemas terrestres, devido a um conjunto de mecanismos forçadores complexos, relacionados com o efeito de Amplificação do Ártico. As mudanças nos regimes de neve e gelo, a par do aumento da temperatura e da precipitação, têm favorecido a rápida degradação do *permafrost*, originando lagos e lagoas termocársicas, e consequentemente novas dinâmicas dos fluxos de Gases de Efeito de Estufa (GEE) que precisam ser contempladas em Modelos Climáticos Globais. Atualmente existe um importante hiato global no que se refere à não consideração, nestes últimos, de corpos de água interiores, com dimensão inferior a 10 000 m<sup>2</sup>. Analogamente à deteção de lagoas termocársicas na superfície terrestre, alterações nas suas propriedades óticas, podem ser consideradas como *proxies* no que se refere à sua capacidade enquanto *hotspots* de GEE, sendo importante a avaliação do potencial de diferentes plataformas de Deteção Remota (DR) para o seu estudo, para além da definição de abordagens estatísticas adequadas, onde a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são uma mais-valia.

Neste trabalho, recorrendo-se a dados de verdade de terreno de muito alta resolução (13 cm) obtidos com uma câmara multiespectral *Sequoia* introduzida num Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), avaliou-se o contributo das imagens de satélite *Landsat 8* e *Sentinel-2* para a análise das características espectrais de pequenas lagoas termocársicas, com áreas de dezenas a alguns milhares de metros quadrados. A abordagem metodológica, visa testar a utilização de imagens de muita alta resolução (*Sequoia*, *WorldView 2* e *WorldView 4*) para a deteção dos limites das lagoas termocársicas, e de imagens de alta resolução (*Landsat 8* e *Sentinel-2*) para a monitorização das suas características espectrais ao longo do ano. Neste âmbito, conclui-se que o satélite *Sentinel-2* é o que melhor reflete os dados de verdade de terreno, introduzindo novas possibilidades para a monitorização das características espectrais de lagoas termocársicas com dimensão superior a 350 metros quadrados.

**Palavras chave:** Lagoas termocársicas; *Sequoia*; *WorldView*; *Landsat 8*; *Sentinel-2*



# ABSTRACT

On the Eastern side of the Hudson Bay, in the Canadian Subarctic, fast changes are affecting the thermal regimes of permafrost and the active layer, with implications on the terrestrial ecosystems, due to a set of complex feedback mechanisms, mostly associated to the Arctic Amplification effect. Changes in snow and sea-ice patterns, along with increasing temperature and precipitation, have led to rapid permafrost degradation, creating thermokarst lakes and ponds. These new dynamics are affecting Greenhouse Gas (GHG) emissions to an extent that still needs to be fully integrated in Global Climate Models. Few considerations have been given to waterbodies below 10 000 m<sup>2</sup>, yet these are known to be biogeochemically more active than larger lakes. Variations in the optical properties of these small thermokarst lakes and ponds provide insights into their capacity for greenhouse gas emissions and can potentially be assessed via different Remote Sensing platforms in combination with statistical approaches and Geographical Information Systems.

I undertook field surveys in lakes and ponds in the region of Kuujuaupik-Whapmagoostui in the summer 2017 using an Unmanned Aerial Vehicle eBee with a *Sequoia* multispectral camera and developed very high resolution (13 cm) orthomosaics and digital surface models for the BGR and KWAK monitoring sites of the Centre of Northern Studies. The data was used as ground truthing for lake spectral characteristics to evaluate the potential use of *Landsat 8* and *Sentinel-2* satellite imagery for research of small lakes and ponds characteristics dynamics. The methodology allowed to evaluate the capacity of very high-resolution imagery (*Sequoia*, *WorldView 2* e *WorldView 4*) for the detection of thermokarst ponds, and of high-resolution images (*Landsat 8* and *Sentinel-2*) for monitoring variability of their spectral characteristics. The results show that *Sentinel-2* imagery, offers the highest correlations with ground truthing data, introducing new possibilities for monitoring the spectral characteristics of thermokarst lakes and ponds with over 350 m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Thermokarst ponds; *Sequoia*; *WorldView*; *Landsat 8*; *Sentinel-2*



# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| AGRADECIMENTOS .....   | 3         |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....   | 5         |
| 1.2. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO .....   | 8         |
| <b>CAPÍTULO 2 – O <i>PERMAFROST</i> E A IMPORTÂNCIA DOS LAGOS E LAGOAS DE TERMOCARSO .....</b>       | <b>11</b> |
| 2.1. O AQUECIMENTO GLOBAL E O EFEITO DE AMPLIFICAÇÃO DO ÁRTICO .....                                 | 11        |
| 2.2. O <i>PERMAFROST</i> : UM COMPONENTE IMPORTANTE DA CRIOSFERA .....                               | 13        |
| 2.3. A FORMAÇÃO DE TERMOCARSO .....  | 15        |
| 2.4. OS LAGOS E LAGOAS TERMOCÁRSICAS .....   | 18        |
| 2.5. A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DOS LAGOS E LAGOAS TERMOCÁRSICAS .....                                  | 21        |
| 2.6. DETECÇÃO DE LAGOS E LAGOAS TERMOCÁRSICAS: A NATUREZA DO PROBLEMA .....                          | 25        |
| <b>CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO REGIONAL E ÁREAS DE ESTUDO .....</b>                                   | <b>29</b> |
| 3.1. ENQUADRAMENTO REGIONAL (KUUVJUAUAPIK – UMIUJAQ) .....   | 29        |
| 3.2. A ÁREA DE ESTUDO DE BGR .....   | 32        |
| 3.3. A ÁREA DE ESTUDO DE KWAK .....  | 33        |
| <b>CAPÍTULO 4 – MÉTODOS E TÉCNICAS .....</b>   | <b>35</b> |
| 4.1. INTRODUÇÃO .....  | 35        |
| 4.2. TRABALHO DE CAMPO E DE VERDADE DE TERRENO (BGR E KWAK) .....                                    | 38        |
| 4.2.1. CARACTERÍSTICAS DOS PLANOS DE VOO .....   | 38        |
| 4.2.2. DELIMITAÇÃO DAS LAGOAS TERMOCÁRSICAS .....  | 47        |
| 4.3. ÁREAS DE TESTE REGIONAL (VALE DE BGR E VALE DE KWAK) .....                                      | 59        |
| 4.3.1. IMAGENS DE SATÉLITE DE MUITO ALTA RESOLUÇÃO ( <i>WORLDVIEW 2</i> E <i>WORLDVIEW 4</i> ) ..... | 59        |
| 4.3.2. PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE DE MUITO ALTA RESOLUÇÃO ..                 | 59        |
| 4.3.3. DELIMITAÇÃO DOS LAGOS E LAGOAS .....  | 60        |
| 4.4. IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO ( <i>LANDSAT 8</i> E <i>SENTINEL-2</i> ) .....            | 65        |
| 4.4.1. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO .....                                     | 65        |
| 4.4.2. PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO .....                    | 66        |
| 4.5. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DA REFLECTÂNCIA .....   | 72        |
| 4.5.1. DADOS DE VERDADE DE TERRENO (CÂMARA MULTIESPECTRAL <i>SEQUOIA</i> ) .....                     | 73        |
| 4.5.2. DADOS DE SATÉLITE ( <i>LANDSAT 8</i> E <i>SENTINEL-2</i> ) .....                              | 74        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.5.3. CUIDADOS E CONSTRANGIMENTOS NA COMPARAÇÃO DAS BANDAS DOS SENSORES <i>SEQUOIA</i> , <i>LANDSAT 8</i> E <i>SENTINEL-2</i> ..... | 77         |
| <b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS.....</b>  | <b>81</b>  |
| 5.1. IDENTIFICAÇÃO DO LIMAR MÍNIMO DIMENSIONAL DAS LAGOAS (BGR E KWAK) .....   | 82         |
| 5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DAS LAGOAS.....  | 82         |
| 5.1.2. SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DA REFLECTÂNCIA ( <i>SEQUOIA VERSUS LANDSAT 8</i> E <i>SENTINEL-2</i> ) .....                 | 90         |
| 5.1.3. SELEÇÃO DO MELHOR SENSOR DE SATÉLITE ( <i>LANDSAT 8 VERSUS SENTINEL-2</i> ) .....   | 94         |
| 5.2. MONITORIZAÇÃO ESPECTRAL DOS LAGOS E LAGOAS (VALE DE BGR E VALE DE KWAK) .....   | 99         |
| 5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LAGOS E LAGOAS.....  | 99         |
| 5.2.2. RESULTADOS E ERROS NOS PROCESSOS DE DELIMITAÇÃO DOS LAGOS E LAGOAS ( <i>SEQUOIA VERSUS WORLDVIEW</i> ) .....                  | 103        |
| 5.2.3. COMPARAÇÃO COM BASES DE DADOS MUNDIAIS (GLWD E GSWE) .....  | 106        |
| 5.2.4. CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL INTRA-ANUAL DOS LAGOS E LAGOAS.....  | 107        |
| <b>6. CONCLUSÃO .....</b>  | <b>115</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>   | <b>119</b> |
| INDÍCE DE FIGURAS.....   | 125        |
| INDÍCE DE TABELAS.....   | 131        |



# AGRADECIMENTOS

Em todo e qualquer trabalho ou circunstância, o primeiro agradecimento será sempre direcionado à minha família e a todos os elementos que dela fazem parte. Ao nosso amor incondicional, à nossa força, garra e união, que nos fazem viver os melhores momentos das nossas vidas e superar todo o tipo de obstáculos. O meu mais sincero obrigado à minha mãe Graça, ao meu pai Rui, à minha irmã Adriana e ao meu irmão mais novo, Tiago, que tão pouco vi crescer, por ditos motivos de força maior. À minha avó materna, Maria Isabel, pela sua energia, alegria e vontade de viver contagiante, apesar dos 80 anos de idade, e que me inspira todos os dias, sem uma única exceção. Ao meu avô paterno Carlos pela garra e compaixão. A todos os filhos e filhas da minha avó e do meu avô, tios e tias, de todos os graus. A todos os meus primos e primas por serem a melhor herança que uma família pode ter. Um bem-haja especial a todos os novos elementos, à minha sobrinha Luena, ao meu primo Benny, ao José, ao Tomás, à Maria, à Magui e à Júlia.

Um sentido obrigado à Andreia pela positividade indescritível, pela transmissão de um sentimento de paz inquebrável e pelas provas constantes de amor incondicional.

Um agradecimento especial aos meus poucos e verdadeiros amigos e amigas, que são também família. À Casa Bissau. Aos *STG Crew*, aos *STG Kids* e aos *Oriente Brotherhood*, por continuarem a partilhar o *beat* do vosso coração comigo e por me ajudarem a levantar depois de cair, não deixando morrer a minha veia artística.

Ao nível académico e profissional, um agradecimento muito especial ao meu Instituto, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território e ao Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa pela Bolsa de Investigação, com especial destaque para a equipa *Zephyrus*. É um verdadeiro orgulho conseguir terminar o meu Mestrado num Instituto que consta no Top 100 das melhores escolas de Geografia do Mundo. Um obrigado a todas as pessoas que têm contribuído para o ensino da Geografia e do Ordenamento do Território em Portugal, ao longo de todos estes anos. Um muito obrigado a todos os docentes, com especial destaque para o Jorge Rocha, Eusébio Reis, Ricardo Garcia, José Zêzere e todos os outros, que de alguma forma contribuíram e continuarão a contribuir para a minha formação. Um obrigado à Caixa Geral de Depósitos pela Bolsa de Mérito que tornou possível a minha continuidade no Instituto.

Um muito obrigado ao Programa Polar Português (PROPOLAR) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia pela sua preocupação em temáticas Globais, como as alterações climáticas, e pelo apoio a jovens investigadores. O meu agradecimento pelo financiamento de uma das viagens académicas mais emocionantes e inspiradoras da minha vida, ao Leste da Baía de Hudson, no Subártico Canadiano, cuja qual tornou possível a realização desta dissertação. Um obrigado ao Centro de Estudos Nórdicos e à Universidade de Laval por disponibilizarem os meios indispensáveis para a campanha.

Um eterno muito obrigado ao meu orientador, Professor Doutor Gonçalo Vieira, por todo o investimento na minha preparação e formação, bem como confiança depositada. Um agradecimento especial aos investigadores e docentes do Projeto *Shrubifly* – Caracterização através de deteção remota de mudanças nas formações vegetais em bacias de fusão do *permafrost* – sendo que esta dissertação se desenrola no âmbito dos objetivos desse projeto. Um obrigado ao meu coorientador, Professor Doutor Warwick Vicent pelo apoio e pelo contributo para a minha formação, com especial destaque para a minha ida ao *Artic Change 2017*, no Quebec, e apoio na missão a leste da Baía de Hudson, bem como ao Professor Doutor Alexander Culley pela possibilidade de integração e cooperação nessa missão. Por fim, um agradecimento especial à bolsa do *International Arctic Science Committee* (IASC) e do *Terrestrial Multidisciplinary distributed Observatories for the Study of Arctic Connections* (T-MOSAIC).

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O Ártico e o Subártico estão em mudança acelerada e o aumento da temperatura do ar e do solo e da precipitação, a par da diminuição do gelo marinho e das alterações dos regimes de neve e gelo sobre a superfície terrestre, têm favorecido a rápida degradação do permafrost. Ao longo da história da Terra, o *permafrost*, também conhecido como substrato permanentemente congelado, que apresenta ampla distribuição no Ártico e no Subártico, tem constituído um armazém natural de carbono, associado à matéria orgânica depositada ao longo de milhares ou mesmo de centenas de milhares de anos, relacionada à atividade dos seres vivos e aos materiais inerentes à sua decomposição. Uma das áreas onde esse carbono orgânico está a ser mobilizado mais rapidamente, são as áreas com termocarso, formando turfeiras, em alguns casos com a presença de *palsas* (montículos orgânicos) e *lithalsas* (montículos minerais), associados à segregação do gelo. A fusão destes e consequente subsidência local da superfície, origina depressões, ocorrendo a formação de lagos e lagoas com a acumulação de massas de água, relacionadas com a fusão e com a modificação hidrológica e geomorfológica local.

Os lagos e lagoas termocársicas, também conhecidos(as) como lagos e lagoas de fusão, são hotspots extremamente dinâmicos em termos espaciais e temporais, frequentemente supersaturados em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) dissolvidos. Favorecem a passagem desses gases, da criosfera para a hidrosfera, e consequentemente para a atmosfera, sendo importantes para o ciclo do carbono e, consequentemente, para a temperatura da Terra. Atualmente existe um importante hiato no conhecimento relativo ao mapeamento, caracterização e monitorização de pequenos lagos, ou lagoas com área inferior a 10 000 m<sup>2</sup>, sendo estas massas de água igualmente importantes em termos biogeoquímicos. Convém salientar, que na bibliografia sobre termocarso, os termos lago e lagoa, são utilizados sem uma distinção formal (Bégin & Vincent, 2017). Verifica-se, por isso, não existir um consenso relativo à diferenciação entre ambos, sendo que existem diversas definições, tendo como base critérios, como o volume, a área, a profundidade ou a presença de certos tipos de habitats (Muster et al., 2017). Nesta dissertação considera-se como lagoa, todos os corpos de água interiores não diretamente conectados ao mar, nem a cursos de água, com área inferior a 10 000 m<sup>2</sup>, seguindo o critério de acordo com a base de dados *PeRL* (Pekel et al., 2016). Acima deste limiar, os corpos de água são definidos como lagos.

A principal motivação para a realização deste trabalho, relaciona-se com o facto de não terem sido encontrados estudos que se dediquem à deteção e monitorização de lagoas termocársicas de pequena dimensão (dezenas a alguns milhares de m<sup>2</sup>), a par da incerteza quanto à sua representatividade e da sua importância não linear para a libertação de Gases de Efeito de Estufa (GEE), com especial destaque para o CH<sub>4</sub>. Assim, torna-se não só importante a deteção de lagoas termocársicas presentes na superfície terrestre, como

também a monitorização das suas dinâmicas intra-anuais, estabelecendo-se relação com a libertação de GEE, através do estudo de mudanças nas suas propriedades óticas. Dada a sua localização remota e em áreas de difícil acesso, destaca-se a importância do uso de diferentes plataformas de Detecção Remota (DR), bem como da aplicação de diferentes métodos estatísticos de análise espacial, enquanto conjunto de materiais e técnicas indispensáveis para o seu estudo. Assim, os materiais utilizados nesta dissertação, que se referem essencialmente a imagens multiespectrais de diferentes resoluções, constituem de sobremaneira, igualmente elementos motivacionais, para a sua realização.

A utilização de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) com uma câmara multiespectral *Sequoia* tornou possível a obtenção de ortomosaicos de muito alta resolução próximos da superfície terrestre, minimizando-se a influência de partículas presentes na atmosfera, ao contrário das imagens multiespectrais provenientes de sensores instalados em satélites, que têm de ser corrigidas e compensadas em termos atmosféricos. O VANT apresenta, no entanto, um pequeno raio de alcance face aos sensores de satélites, exigindo ainda a realização de trabalho de campo. Atualmente, existem satélites com sensores que permitem a obtenção de imagens multiespectrais de muito alta resolução para toda a superfície terrestre, sendo, no entanto, de utilização comercial, possuindo custos elevados. Ao contrário da necessidade de realização de trabalho de campo para proceder à utilização de um VANT e do preço elevado das imagens multiespectrais de muito alta resolução de satélites comerciais, a missão *Landsat* e a missão *Sentinel* oferecem imagens multiespectrais de alta resolução, gratuitas e contínuas da superfície terrestre. A missão *Landsat*, através de toda a sua constelação composta por 8 satélites com sensores óticos, iniciada em 1972, apresenta a mais longa série de dados relativos à monitorização da superfície terrestre. Por outro lado, a nova missão *Sentinel*, operacional desde 2014, com os seus atuais 6 satélites, e futuros 14 satélites, apresenta fortes ambições relativas à monitorização da Terra, devido a melhorias e inovações introduzidas ao nível da resolução temporal, espacial e espectral dos sensores óticos passivos e ativos dos satélites em questão.

Ao contrário da missão *Landsat*, em que os satélites foram desenvolvidos essencialmente para a monitorização terrestre, possuindo todos mais ou menos as mesmas características, a missão *Sentinel* apresentará uma oferta de satélites com diferentes características, direcionados para a monitorização ótima de diversos elementos e fenómenos presentes na superfície terrestre, atmosfera e oceanos (ESA (A), 2018). Os satélites *Sentinel-3* serão os mais aconselhados para a monitorização de corpos de água, no entanto, a sua resolução espacial de 300 metros, impossibilitará a sua aplicação em lagoas termocársicas muito pequenas (Toming et al., 2016). Como tal, as potencialidades inseridas pelos satélites *Sentinel-2* (S2), continuarão a ser uma mais valia para a monitorização de lagoas termocársicas, bem como outros pequenos corpos de água interiores de pequena dimensão (Toming et al., 2016).

Nesta dissertação procede-se à utilização de imagens multiespectrais de muito alta resolução e de alta resolução, nomeadamente procurando-se extrair os limites e os valores de reflectância das lagoas de forma precisa, recorrendo-se às primeiras, e monitorizar as características espectrais intra-anuais das lagoas, recorrendo-se às segundas. Esta dissertação constitui a primeira abordagem metodológica sólida

desenvolvida, tendo em vista a exploração das potencialidades máximas das imagens de satélite *Landsat-8* (L8) e S2, para a realização de análises espectrais corretas sobre lagoas termocársicas de pequena dimensão, estabelecendo-se um limiar dimensional mínimo.

Numa ótica de comparação entre os ortomosaicos multiespectrais obtidos com uma câmara *Parrot Sequoia* num VANT para as áreas de verdade de terreno e as imagens *WorldView 2* (WV 2) e *WorldView 4* (WV 4) para as áreas de teste regional, esta dissertação desenvolve-se com os seguintes objetivos:

- Identificar o limiar dimensional mínimo das lagoas termocársicas, a partir do qual as imagens multiespectrais de alta resolução do L8 e do S2 têm bom desempenho, identificando as diferenças entre ambas.
- Monitorizar a variação sazonal das características espectrais das lagoas nas áreas de teste regional, recorrendo-se ao uso do melhor sensor de satélite resultante da análise anterior (L8 ou S2).

Tanto nas áreas de verdade de terreno, como nas áreas de teste regional, procedeu-se à delimitação prévia das lagoas, recorrendo-se a imagens de muito alta resolução, nomeadamente considerando os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para as áreas de verdade de terreno, e as imagens WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional. Realizou-se a análise espectral a partir de imagens dos satélites L8 e S2, considerando a área interior das lagoas previamente definidas.

## 1.2. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho incide sobre duas áreas localizadas no Subártico Canadiano, a este da Baía de Hudson, entre as vilas de Kuujjuarapik- Whapmagoostui e Umiujaq, que são locais de monitorização de longo prazo do Centro de Estudos Nórdicos da Universidade de Laval. A região tem apresentado um aumento substancial da temperatura, em cerca de 2°C, e da precipitação, em cerca de 100 mm, desde 1950, com especial destaque para o início do século XXI (Payette et al., 2004). Vários autores têm documentado concentrações significativas de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> nas lagoas do Subártico, comparativamente às do Ártico (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Matveev et al., 2016). Para além deste facto, o deslocamento da fronteira meridional das zonas de *permafrost* em direção a Norte, torna as lagoas do Subártico mais vulneráveis e dinâmicas do ponto de vista geomorfológico, limnológico, sedimentológico, biológico e biogeoquímico.

As lagoas termocárcicas presentes no Ártico e Subártico Canadiano representam uma significativa fonte de CH<sub>4</sub> para a atmosfera, sendo este, em termos atmosféricos, um gás mais poderoso que o CO<sub>2</sub> (Breton et al., 2009). Contudo, existem ainda incertezas quanto à quantificação exata das emissões das lagoas termocárcicas, limitando a realização de extrapolações para o ciclo do carbono global (Laurion et al., 2010). Estes fatores justificam a pertinência do estudo.

As áreas de estudo de referência nesta dissertação, são abreviadamente identificadas como BGR e KWAK, estando localizadas na zona de *permafrost* descontínuo e na zona de *permafrost* esporádico, respetivamente. Ambas são caracterizadas pelo colapso de *lithalsas* e consequente formação de lagoas termocárcicas. São ainda afetadas por intensos fenómenos de arbustização, termo referente à rápida expansão das comunidades arbustivas, e de terrestrialização, devido à acumulação de turfa e de sedimentos, com especial destaque para KWAK, o que evidencia a capacidade natural da vegetação de colonizar áreas lacustres, aspeto importante para o sequestro de CO<sub>2</sub>.

Nas áreas de estudo de BGR e de KWAK, procedeu-se à realização de planos de voo com um VANT e consequente captação de imagens com uma câmara multiespectral *Sequoia*, calibrada em termos radiométricos, gerando-se posteriormente ortomosaicos multiespectrais de muito alta resolução (13 centímetros). As áreas abrangidas pelos planos de voo são consideradas como as áreas de verdade de terreno para a validação das imagens de satélite, nomeadamente no que respeita aos limites dimensionais e valores de reflectância extraídos das lagoas termocárcicas. Estas áreas de estudo de maior pormenor, são designadas ao longo do trabalho como áreas de verdade de terreno de BGR e de KWAK. Cada uma delas, por sua vez, está integrada em setores mais amplos, que servem para realizar os testes metodológicos à escala regional e que são designadas por Vale de BGR e Vale de KWAK. Ao contrário das áreas de verdade de terreno, que se referem a áreas com menos de 1 km<sup>2</sup>, as áreas de teste regional referem-se a 25 km<sup>2</sup> e a sua análise foi apoiada por imagens multiespectrais de muito alta resolução, dos satélites *WorldView 2* (Vale de BGR) e *WorldView 4* (Vale de KWAK), bem como em imagens *Landsat 8* e *Sentinel-2*.

Ao contrário das imagens comerciais de muito alta resolução do satélite *WorldView (Digital Globe)*, que possuem uma resolução espacial na ordem das dezenas de centímetros a poucos metros por pixel, os satélites *Landsat* e *Sentinel* oferecem dados multiespectrais gratuitos de alta resolução, na ordem das dezenas de metros por pixel (10, 20, 30 e 60 metros). Como tal, procura-se dar particular destaque ao potencial das imagens multiespectrais de alta resolução da missão *Landsat*, operacional desde 1974, considerando o satélite ótico passivo *Landsat 8 (L8)* e da nova missão *Sentinel*, operacional desde 2014, considerando os satélites óticos passivos *Sentinel-2 (S2 = Sentinel-2A e Sentinel-2B)*.





## CAPÍTULO 2 – O *PERMAFROST* E A IMPORTÂNCIA DOS LAGOS E LAGOAS DE TERMOCARSO

### 2.1. O AQUECIMENTO GLOBAL E O EFEITO DE AMPLIFICAÇÃO DO ÁRTICO

A Terra tem sofrido um aumento substancial da temperatura, que se tem pronunciado de forma mais acentuada desde o final do século XX e início do século XXI (IPCC, 2014). O aumento da temperatura deve-se a um conjunto complexo de fatores, temporalmente e espacialmente variáveis, que se traduzem em mecanismos de retroação positiva (amplificador) ou negativa (reductor), com repercussões diretas e/ou indiretas no sistema climático.

O aumento da temperatura do ar global é uma resposta ao aumento da concentração de GEE na atmosfera, sendo mais acentuado no Ártico comparativamente a latitudes inferiores do Hemisfério Norte e ao Hemisfério Sul (Serreze et al., 2009; AMAP, 2017). As atividades humanas são o principal fator contribuidor para o aumento de GEE na atmosfera, embora aja igualmente o contributo de certos mecanismos forçadores naturais (IPCC, 2014; AMAP, 2017). Estima-se um aumento, desde 1750, das concentrações de CO<sub>2</sub> na ordem dos 40%, de metano CH<sub>4</sub> na ordem dos 150% e de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) na ordem dos 20% (IPCC, 2014).

Durante o período de 1960 a 2011 o Ártico, com especial destaque para o Ártico Canadano, apresentou um aumento da temperatura média do ar na superfície de 2°C, o que representa o dobro da média global (AMAP, 2017) (fig. 1). As temperaturas do Ártico são conjuntamente um indicador e um motor de mudanças regionais e globais (Overland, et al., 2015).

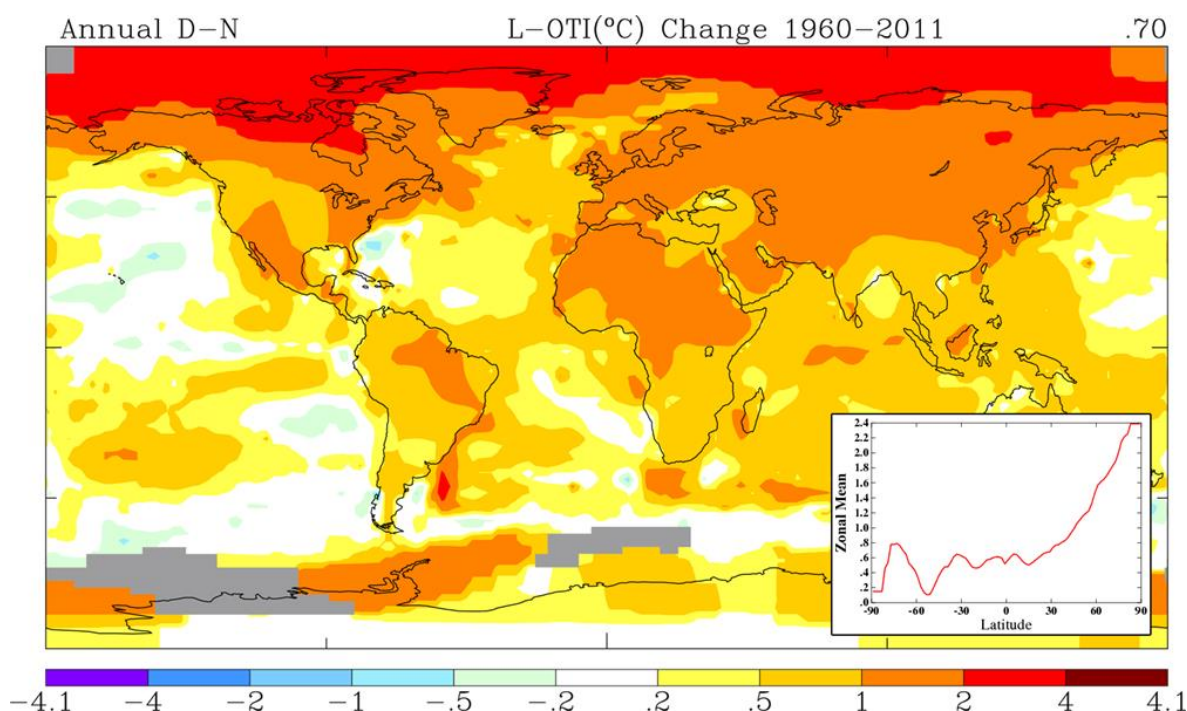


Figura 1: O efeito de amplificação do Ártico – tendências na temperatura média do ar na superfície durante o período de 1960 a 2011 (NASA – Goddard Institute for Space Studies)

Conforme o clima aquece, o período de fusão durante o verão fica mais longo e intensifica-se, o que provoca a diminuição do gelo marinho no final do verão. A absorção da energia solar durante o verão em áreas livres de gelo marinho (diminuição do albedo) origina o aumento do conteúdo de calor sensível por parte do oceano e por conseguinte o aumento da sua temperatura, sendo que a formação de gelo durante o outono e inverno, importante para isolar o oceano quente da atmosfera fria (condicionando a transferência de calor para a atmosfera), atrasa-se progressivamente (Serreze et al., 2009; Vincent, 2009; Grannas et al., 2013; Overland et al., 2015);

A temperatura do oceano tem aumentado superficialmente e em profundidade (AMAP, 2017). O aquecimento do oceano domina o aumento de energia armazenada no sistema climático, com 90% do total da energia acumulada entre 1971 e 2010, armazenando a atmosfera apenas 1% do valor total (IPCC, 2014). Este fator, em conjugação com as mudanças verificadas nos glaciares, contribui ainda para a subida do nível médio da água do mar, devido principalmente à sua expansão térmica (IPCC, 2014). As alterações climáticas estão a ser acompanhadas de uma série de impactos negativos sobre os ecossistemas, com consequências diretas e indiretas para a humanidade, sendo dos mais importantes fatores para a perda de biodiversidade a nível mundial (Djoghla, 2008).

Desde o lançamento do *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR) em 1979, satélites passivos com instrumentos de micro-ondas têm sido utilizados para determinar a extensão do gelo marinho (Perovich et al., 2015). Desde então a taxa de diminuição da sua extensão tem sido de 3,5% a 4,1% por década (IPCC, 2014) (fig. 2). Estima-se que durante o período de 1975 a 2012 a espessura do gelo marinho no centro do Oceano Ártico tenha diminuindo em 65% (AMAP, 2017). O gelo mais antigo tende a ser mais resiliente a mudanças forçadas pela atmosfera e pelo oceano comparativamente ao gelo mais recente. Em 1985 cerca de 20% do gelo marinho era antigo, sendo este valor, atualmente, de apenas 3% (Perovich et al., 2015). Atualmente, a maioria do gelo marinho do Ártico é sazonal, sendo que se forma no outono e inverno, mas descongela durante a primavera e verão (AMAP, 2017). O Oceano Ártico poderá ficar livre de gelo mais cedo do que o esperado, sendo que extrapolações de dados recentes observados indicam um Oceano Ártico livre de gelo durante o verão, já em 2030 (AMAP, 2017).

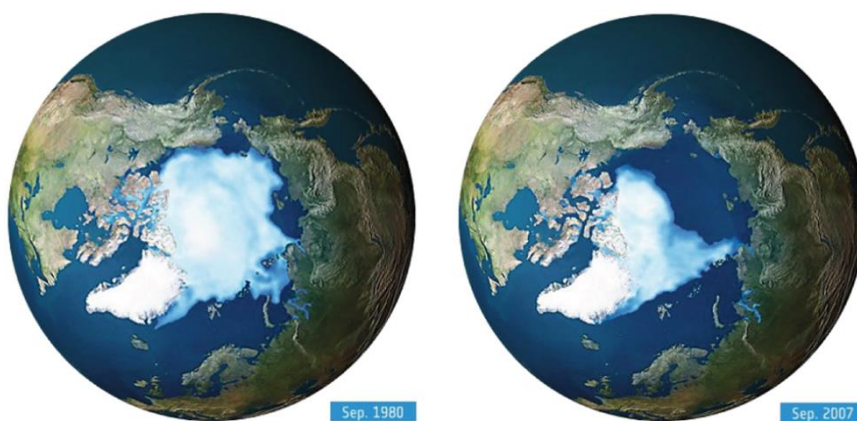


Figura 2: Mínimo de cobertura de gelo marinho do Ártico em situação de final de verão em 1980 e 2007 (Copernicus Brief – Monitoring Climate Change in the Arctic, 2013)

## 2.2. O PERMAFROST: UM COMPONENTE IMPORTANTE DA CRIOSFERA

A criosfera é particularmente sensível ao aquecimento global e pode ser simplificadamente definida como a parte da superfície da Terra onde a água está presente em estado sólido. Encontra-se nas altas latitudes, altas altitudes, e em regiões de latitudes médias e boreais, sendo que inclui o gelo marinho, gelo nos lagos, gelo nos rios, neve, glaciares, calotes de gelo, mantos de gelo (*inlandsis*), o solo permanentemente congelado (*permafrost*) e o solo sazonalmente congelado (French, 2007; Grannas et al., 2013). Representa uma componente importantíssima para a regulação do clima da Terra. O gelo e a neve desempenham um importante papel nos processos químicos atmosféricos (Grannas et al., 2013). A criosfera representa um papel crucial no balanço energético da Terra através de dois mecanismos, nomeadamente o transporte de calor e o albedo (Grannas et al., 2013). Representa ainda uma componente importante ao nível do ciclo global da água, sendo que as calotes polares concentram 75% dos recursos hídricos de água doce mundiais (IPCC, 2014).

Segundo French (2017), o *permafrost*, ou substrato permanentemente congelado, considerado assim quando a temperatura é inferior a 0° C durante pelo menos dois anos consecutivos, inclui o solo, a rocha e a matéria orgânica que nele se encontre. Possui uma camada ativa de cerca de 1 metro de profundidade, que congela durante o inverno e descongela durante o verão. O *permafrost* encontra-se presente com especial destaque no Ártico e na Antártida, não só em áreas emersas, mas também sob a forma de *permafrost* submarino nas plataformas continentais. Adquire particular importância no Hemisfério Norte, onde representa 25,6% da superfície dos continentes (May, 2011 citado por Zhan et al., 1999). Está distribuído em faixas latitudinais no Ártico e no Subártico, sendo agrupado em contínuo, descontínuo, esporádico e isolado (fig. 3). A distribuição do *permafrost* é controlada por vários fatores, sendo o clima o mais importante. Fatores locais incluem a condutividade e difusividade térmica dos materiais terrestres, a vegetação, a cobertura de neve, a topografia, a exposição, a ocorrência de fogos e a ocorrência de corpos de água (French, 2007).

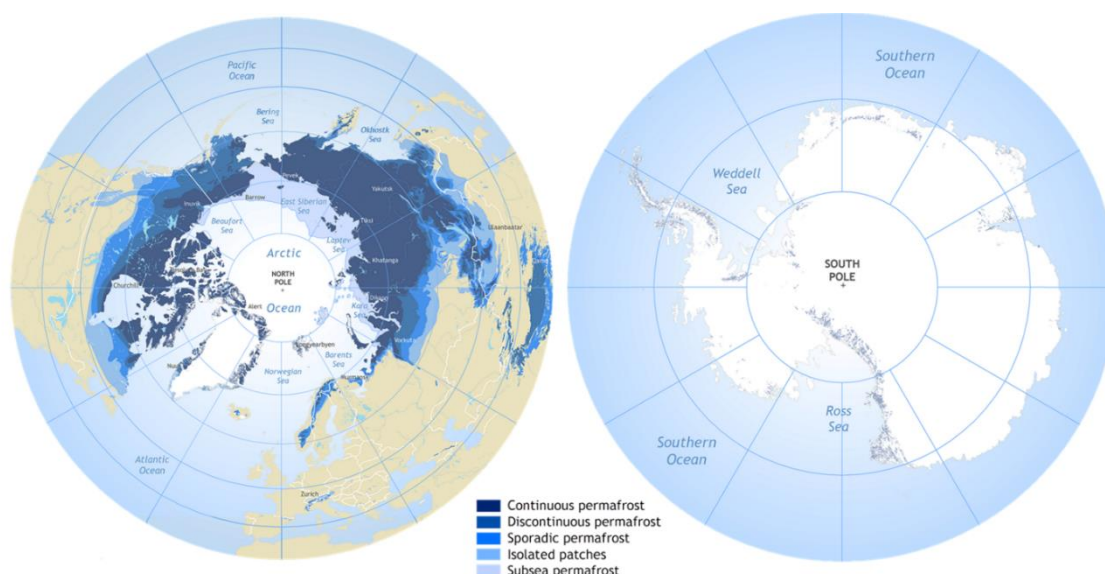


Figura 3: Distribuição das diferentes zonas de *permafrost* no Hemisfério Norte e Hemisfério Sul (International Permafrost Association – Brown et al., 1997)

As principais regiões mundiais com *permafrost* estão situadas na Rússia, Canadá, China, Gronelândia e nos Estados Unidos da América, mais concretamente no Alasca (tabela 1). A Rússia é o país que apresenta maior área com *permafrost*, seguida do Canadá e da China. Metade da área total da Rússia e do Canadá contêm *permafrost*.

Tabela 1: Extensão de áreas terrestres com *permafrost* no Hemisfério Norte (Adaptado de French, 2007)

| Principais regiões com <i>permafrost</i> | Área (milhões de km <sup>2</sup> ) | Percentagem de <i>permafrost</i> (%) |
|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| Rússia                                   | 16,8                               | 50                                   |
| Canadá                                   | 9,4                                | 50                                   |
| China                                    | 9,4                                | 22                                   |
| Gronelândia                              | 2,2                                | 100                                  |
| EUA (Alasca)                             | 1,5                                | 82                                   |

## 2.3. A FORMAÇÃO DE TERMOCARSO

As mudanças climáticas projetadas para o Ártico irão dramaticamente reduzir a cobertura de gelo marinho e terrestre, bem como degradar de forma significativa o *permafrost*. Modelos climáticos estimam que a média da temperatura durante o inverno aumente entre 5 e 6°C e a média da temperatura anual aumente 4 a 5°C, sendo que a estação de crescimento (período com temperatura média diária  $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ) poderá aumentar entre 70 a 150 dias e a precipitação poderá aumentar entre 150 a 300 mm (French, 2007).

Os solos do Ártico concentram 50% do carbono global armazenado no solo (AMAP, 2017). O aumento da temperatura do ar e do solo e da precipitação têm originado a aceleração do descongelamento do *permafrost* e a mobilização do carbono orgânico armazenado durante milhares de anos, sendo um mecanismo de retroação positiva para o aumento da temperatura global (Payette et al., 2004; Vallée & Payette, 2007; Breton et al., 2009; Hachem et al., 2009; Vincent, 2009; Laurion et al., 2010; May, 2011; Ropars & Boudreau, 2012). Assim, o descongelamento do *permafrost* contribuirá de forma substancial para futuras emissões de GEE, com especial destaque para o  $\text{CH}_4$ , que tem um efeito mais forte para o aquecimento como GEE que o  $\text{CO}_2$  (Matveev et al., 2016; AMAP, 2017). Estima-se que os solos com *permafrost* tenham potencial para emitirem entre 68 e 508 Pg (petagramas) de carbono até 2100 (Matveev et al., 2016). A recente degradação do *permafrost* no Ártico e Subártico vai consideravelmente modificar o armazenamento de carbono global através de mecanismos de retroação envolvendo o clima, o balanço hidrológico e os ciclos biogeoquímicos (Laurion et al., 2010; Bouchard et al., 2011).

A temperatura do *permafrost* tem aumentado na maior parte das regiões do Hemisfério Norte desde 1980, em resposta ao aumento da temperatura da superfície e alterações do regime de neve e gelo, com a redução da sua espessura e da sua extensão na maior parte das regiões do Ártico e Subártico (IPCC, 2014). O *permafrost* próximo da superfície no Ártico aqueceu até 3°C desde 1980 e a espessura da camada ativa tem aumentado na maior parte das áreas onde o *permafrost* é monitorizado (Djoghla, 2008; AMAP, 2017). Projeções indicam que haja uma diminuição de 35% da área de *permafrost* próximo da superfície em apenas meio século (AMAP, 2017). Conforme o *permafrost* aquece e ocorre a deslocação da sua fronteira meridional em direção ao Norte, ocorrem uma série de impactos ao nível hidrológico, da estabilidade da superfície terrestre, da vegetação e dos ciclos biogeoquímicos, incluindo retroações com o sistema climático (fig. 4). A degradação do *permafrost* acarreta ainda consequências diretamente ligadas às atividades humanas, como a instabilidade de vias de comunicação, perturbações na estabilidade das fundações dos edifícios (May, 2011), para além de impactos sociais e económicos, uma vez que cerca de 4,3 milhões de pessoas vivem em áreas com *permafrost* (comunicação pessoal com a Dr<sup>a</sup>. Joan Nymand Larsen do Instituto Ártico Stefansson da Islândia, no primeiro *Workshop* do projeto Nunataryuk – Adaptação socioeconómica e a costa do Ártico em mudança). A degradação do *permafrost* faz-se acompanhar de marcas na paisagem, especialmente na zona de *permafrost* descontínuo, mais concretamente no Subártico (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010). Algumas dessas marcas são identificadas como termocarso. Este termo tem sido aplicado a processos



associados ao descongelamento do *permafrost*, o que gera colapso local ou difundido, subsidência, erosão e instabilidade da superfície terrestre (French, 2007; Bouchard et al., 2014; Bégin & Vincent, 2017).

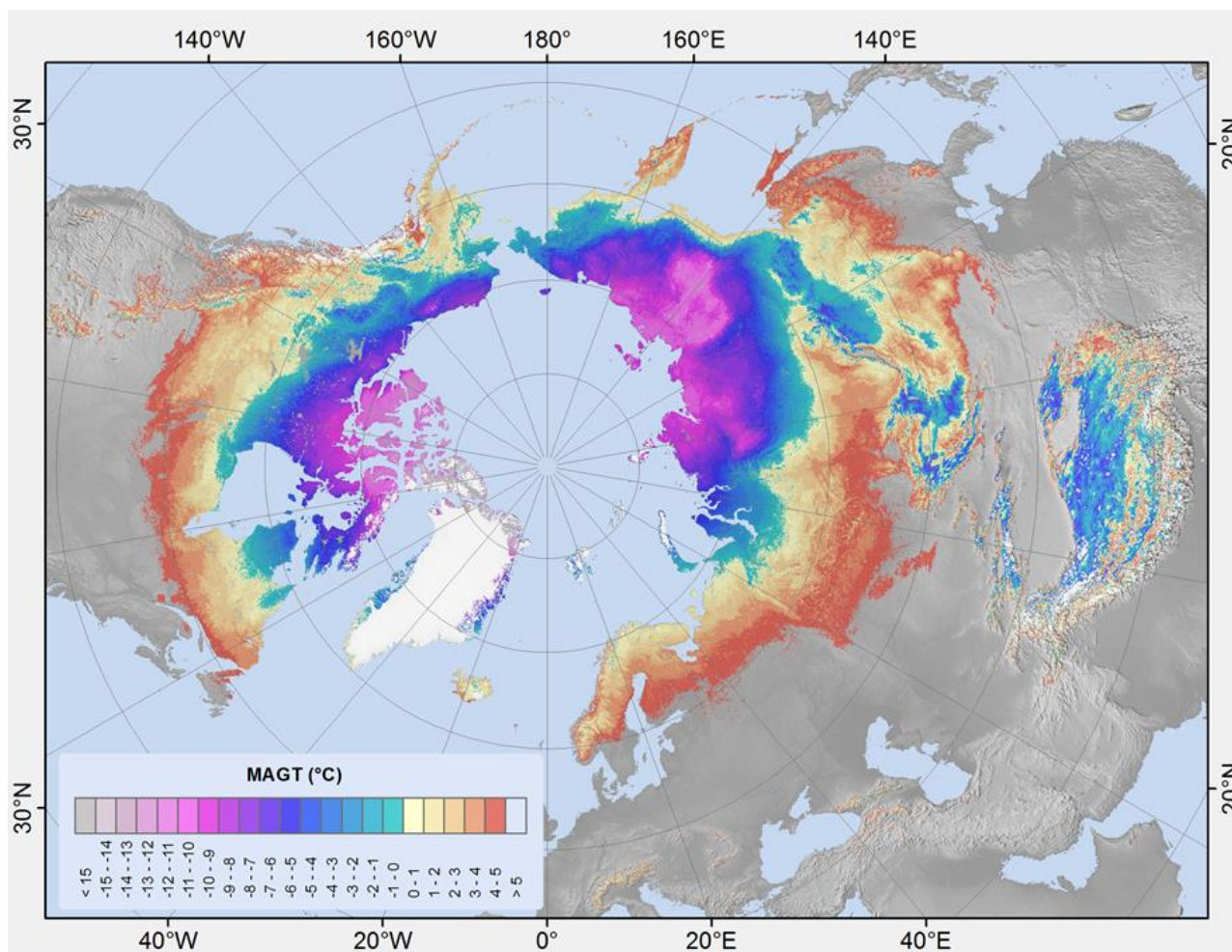


Figura 4: Temperatura média anual do solo em regiões com *permafrost* no Hemisfério Norte (2000 – 2016) (Bartsch et al., 2018)

O desenvolvimento de áreas com termocarso é devido primeiramente a perturbações no equilíbrio térmico do *permafrost* relacionadas com o aumento da temperatura da superfície e consequentemente com o aumento da espessura da camada ativa (French, 2007). As características das paisagens com termocarso podem ser causadas por processos como a solifluxão, a subsidência, o colapso, a erosão das margens, entre outros (French, 2007; May, 2011). Alguns dos elementos característicos das paisagens com termocarso, são montículos de *permafrost* orgânicos (*palsas*) ou mineralógicos (*lithalsas*), podendo encontrar-se em fase de degradação, traduzindo-se na consequente formação de lagos ou lagoas termocársicas (fig. 5).

A subsidência total ou parcial de *palsas* e *lithalsas*, é vista como um dos principais fatores para a formação de lagoas termocársicas no Subártico, devido à degradação do *permafrost* rico em gelo (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Bouchard et al., 2011; May, 2011). Assim, a degradação de *palsas* e *lithalsas* e a formação de lagos ou lagoas termocársicas são indicadores que espelham diferentes fases da degradação do *permafrost*, com especial destaque para alterações na dinâmica da espessura da camada ativa, em termos temporais e espaciais (Vallée & Payette, 2007).



Figura 5: *Palsas* em estado de degradação (subsidência local parcial) num dos locais de monitorização de longo prazo do Centro de Estudos Nórdicos, na zona de permafrost descontínuo do Subártico Canadano (SAS – 55°13'N; 77°42'O)

## 2.4. OS LAGOS E LAGOAS TERMOCÁRSICAS

A formação de lagos e lagoas de fusão é um fenómeno natural associado à dinâmica da camada ativa e do *permafrost*. No entanto, a sua importância tem vindo a aumentar devido ao acelerado aquecimento global e consequente degradação do *permafrost* (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; May, 2011). Processos erosivos biogeoquímicos e mecânicos originam a passagem dos GEE do sistema aquático para a atmosfera, através de transformações fotoquímicas e microbianas, com especial destaque para o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Bouchard et al., 2011; May, 2011; Bouchard et al., 2014; Lindgren et al., 2016). Assim, os sistemas termocársicos supersaturados em GEE contribuem enquanto mecanismo de retroação positiva para o aumento da temperatura global (Bouchard et al., 2014; Polishchuk et al., 2015). Este facto evidencia a necessidade de os contemplar em modelos globais do balanço do carbono e modelos climáticos, dando especial destaque à variabilidade e dinâmica anual e intra-anual que apresentam (Breton, et al., 2009; Laurion et al., 2010).

Os lagos e lagoas termocársicas apresentam diferentes características e dinâmicas espaciais e temporais. Encontram-se espalhados(as) pelo Ártico e Subártico, em áreas de tundra e floresta boreal, com especial destaque para o Norte da Escandinávia, Sibéria, Alasca e Canadá (Bouchard et al., 2011; Kokelj & Jorgenson, 2013; Bouchard et al., 2014; Lindgren et al., 2016; Matveev et al., 2016). O Canadá apresenta 4 milhões de km<sup>2</sup> com *permafrost*, o que representa 50% do país, sendo que se estima que 5% sejam lagos e lagoas termocársicas que envolvem erosão do solo, estando este valor, no entanto, provavelmente subestimado, segundo Laurion et al (2010).

A supersaturação em CH<sub>4</sub>, sobretudo nas lagoas do Subártico, evidencia a importância de estimar a sua contribuição a um nível global (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Lindgren et al., 2016; Matveev et al., 2016). Para além deste facto, uma parte significativa do *permafrost* no Subártico Canadiano, é considerado como quente, estando por isso no limiar de descongelamento (Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014). O aquecimento global originará o desaparecimento de lagos e lagoas termocársicas no Subártico e o aparecimento de outros(as) no Ártico, à medida que a fronteira meridional do *permafrost* se desloca para Norte, juntamente com novas dinâmicas de fluxos dos GEE, antecipando a necessidade de monitorização destes lagos, lagoas e paisagens (Vincent, 2009; May, 2011, Kokelj & Jorgenson, 2013; Polishchuk et al., 2015; Matveev et al., 2016). Os diferentes estágios de evolução dos lagos e lagoas termocársicas podem ser considerados como um processo contínuo e indicador de mudanças ambientais (fig. 6). Numa fase inicial, ocorre a erosão das *palsas* e *lithalsas* (fig. 6 – A), seguido da subsidência local da superfície com a sucessiva formação de lagoas termocársicas devido à acumulação de água nessas depressões (fig. 6 – B), ocorrendo posteriormente o aumento da sua dimensão (fig. 6 – C e D) em consonância com a contínua fusão do *permafrost* e com o desenvolvimento de vegetação terrestre e aquática nas suas margens (Breton et al., 2009; Vincent, 2009; Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014; Bouchard et al., 2016).



A temperatura e a precipitação têm efeitos diretos nas características físicas, químicas e biológicas dos lagos e lagoas (Vincent, 2009). As lagoas termocársicas da zona de *permafrost* descontínuo (Subártico) são bastante suscetíveis a sofrerem impactos relacionados com as alterações climáticas, não só devido à sua menor dimensão (dezenas a centenas de m<sup>2</sup>) e profundidade (geralmente de 1 a 5 metros de profundidade) face aos lagos e lagoas da zona de *permafrost* contínuo (Ártico), mas também por apresentarem uma abundante comunidade de rotíferas dominada por poucas espécies, o que aumentará a sua vulnerabilidade relativamente à chegada de novas taxa do Sul, sendo que sistemas com pouca diversidade tendem a ser menos resistentes a espécies invasoras (Bégin & Vincent, 2017). Por representarem um sistema de habitats essencialmente heterotróficos, as lagoas termocársicas possuem igualmente diversas comunidades fototróficas que consomem o CO<sub>2</sub>, reduzindo as suas taxas de emissão para a atmosfera, sobretudo nas que apresentam maior concentração de *Dissolved Organic Carbon* (DOC) e menor nível de pH, sendo mais antigos (Przytulska et al., 2015).

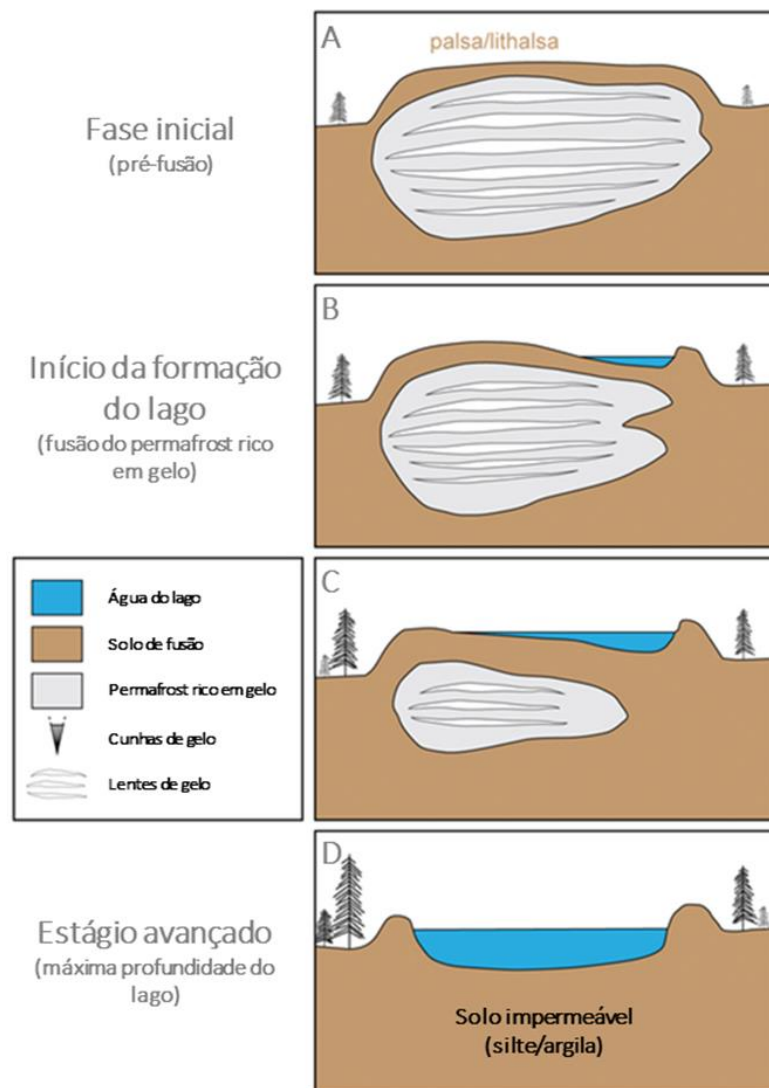


Figura 6: Estágios de degradação de uma *palsa* ou *lithalsa*: A – *Palsa/lithalsa* antes do início da degradação, B e C – Fusão das lentes de gelo de segregação, resultando em subsidência da superfície e acumulação de água em depressões, D – Lagoa termocársica cercada por uma crista periférica, ocorrendo a sua estabilização, caso o substrato seja composto por silte e argila impermeáveis (Adaptado de Bouchard et al., 2016)

Existem vários processos físicos e químicos inerentes à formação de lagoas termocárcicas, no entanto, a degradação de *palsas* e *lithalsas*, acompanhada da subsidência local parcial ou total da superfície terrestre, é considerado o principal fator para a sua formação no Subártico (zona de *permafrost* descontínuo e esporádico), contribuindo para as elevadas concentrações de *Dissolved Organic Matter* (DOM) (Bouchard et al., 2011; Watanabe et al., 2011). No entanto, o conteúdo de DOM por si, não permite explicar toda a variabilidade de lagoas termocárcicas existentes (Bouchard et al., 2011). Existe uma enorme variabilidade de lagoas termocárcicas ao longo de pequenas áreas, como resultado da combinação entre diferentes características limnológicas, sedimentológicas, biogeoquímicas e geomorfológicas. Essas características espelham-se através das suas propriedades óticas com o passar do tempo, fazendo com que contribuam de forma diferenciada para a liberação de GEE (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Watanabe et al., 2011).

A estabilidade e o ciclo de vida das lagoas termocárcicas é fortemente controlada por variações climáticas regionais, como também por fatores locais, essencialmente hidrológicos e relacionados com as propriedades do substrato, fazendo com que existam diferentes tendências em várias áreas, influenciando a sua persistência na paisagem, de dias a milhares de anos (Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014).

As paisagens onde as lagoas se encontram sofrem ainda intensos fenômenos de arbustização e terrestrialização com o aumento considerável das comunidades arbóreas, arbustivas densas e acumulação de turfa, sendo ecossistemas produtivos e contribuindo em parte, para o sequestro, de pelo menos, CO<sub>2</sub> (Payette et al., 2004; Laurion et al., 2010; Ropars & Boudreau, 2012; Bouchard et al., 2014) (fig. 7).

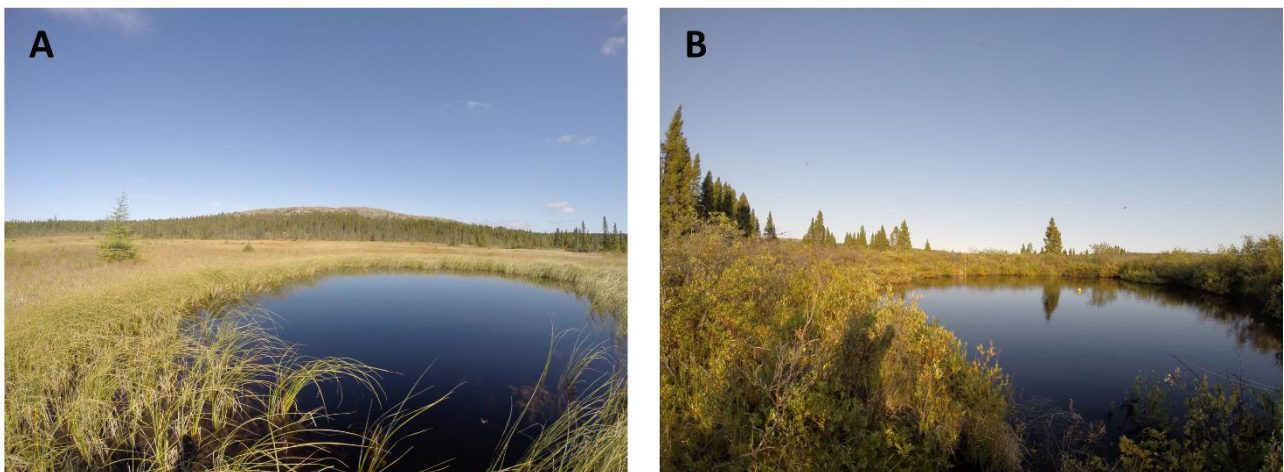


Figura 7: Lagoas termocárcicas em SAS (A – 55°13'N; 77°42'O) e em KWAK (B – 55°19'N; 77°30'O), podendo, nesta última, verificar-se o fenômeno de arbustização com *Betula glandulosa*, *Alnus crispa* e *Salix planifolia*

## 2.5. A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DOS LAGOS E LAGOAS TERMOCÁRSICAS

Vários estudos têm sido desenvolvidos por forma a melhorar o conhecimento relativo às áreas onde o *permafrost* se encontra em degradação, existindo uma enorme quantidade de literatura sobre termocarso, baseada no estudo das altas latitudes do Hemisfério Norte, com especial destaque para o Ártico e Subártico. Nesta dissertação consideram-se essencialmente estudos desenvolvidos no Subártico e Ártico do Quebeque (Canadá), mais precisamente nas áreas de estudo identificadas como BGR e como KWAK, mas também outros estudos que procuram explorar as potencialidades de várias plataformas de DR no que toca à deteção, caracterização e monitorização de lagos e lagoas, com especial destaque para os(as) de origem no termocarso.

Vários estudos têm sido realizados numa perspetiva de observação e quantificação de processos físicos e químicos associados à evolução das áreas com termocarso, nomeadamente, no que respeita à degradação de *palsas* e *lithalsas*, alterações no número, área e morfologia das lagoas termocársicas, bem como no coberto vegetal, com especial destaque para a análise de processos associados à arbustização e terrestreização (Beck et al., 2015). Ao nível das plataformas de DR, os estudos, regra geral, utilizam imagens de diferentes datas e sensores, sobretudo de muito alta resolução, uma vez que certos elementos presentes na superfície terrestre são indicadores dos diferentes estágios de degradação do *permafrost*. A principal questão que procuram responder reside na identificação da importância das áreas com termocarso para o balanço global do carbono, naquilo que Payette et al (2004) definiram como *C-Source* (fonte de carbono – desenvolvimento de lagoas termocársicas) versus *C-Sink* (sumidouros de carbono – desenvolvimento de vegetação e acumulação de turfa). Assim, estas duas vertentes têm sido fortemente estudadas, por forma a elevar o conhecimento relativamente à função das lagoas termocársicas enquanto libertadoras dos GEE (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O), bem como no que respeita à sua influência no desenvolvimento da vegetação e acumulação de turfa, e suas consequências para a atenuação da libertação de GEE. Esta relação entre lagoas termocársicas e vegetação continuará certamente a ser explorada no futuro.

Bouchard et al (2014), cientes da necessidade de monitorização de paisagens com termocarso de uma forma completa, procuraram estabelecer relação entre as transformações da paisagem, o desenvolvimento de lagoas termocársicas e do coberto vegetal, considerando um período temporal de cinco décadas e incidindo na área de estudo de KWAK. Para esta análise procederam à utilização de dados de DR, nomeadamente fotografias aéreas de 1959 e imagens de satélite *QuickBird* de muito alta resolução, de 2006. Foram capazes de identificar um conjunto de transformações morfológicas e limnológicas de várias lagoas utilizadas como amostra, bem como o intenso fenómeno de arbustização e terrestreização que as áreas com termocarso têm sofrido. Constataram a importância das propriedades locais da paisagem na modulação de mecanismos forçadores regionais (clima). Este estudo revelou-se fundamental, por forma a documentar essencialmente três mecanismos que ocorrem em áreas com termocarso:

- Fusão das *palsas*, modificando a hidrologia e geomorfologia local e fornecendo novos *inputs* de sedimentos, água e elementos químicos;
- Início e evolução de lagoas termocársicas, atuando como reservatórios temporários biogeoquímicos e potencialmente contribuindo para a emissão local de GEE para a atmosfera, através de águas fortemente estratificadas;
- Desenvolvimento e densificação da vegetação, conduzindo mudanças na profundidade da neve e na sua distribuição, afetando as propriedades do solo, como o calor e a humidade.

Vários estudos procuram uma relação entre a evolução das áreas com termocarso e as alterações ao nível das propriedades óticas e respetivas propriedades ou características limnológicas, sedimentológicas e biogeoquímicas das lagoas termocársicas, dando especial destaque à sua capacidade enquanto *hotspots* de GEE. Estes estudos são de particular importância no âmbito desta dissertação uma vez que, de uma forma mais abrangente e multiescalar, focam as aplicabilidades de diferentes plataformas de DR, estabelecendo relação entre as propriedades óticas e a libertação de GEE (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Bouchard et al., 2011; Watanabe et al., 2011; Bouchard et al., 2014). A relação entre a produção dos GEE e as diferentes propriedades óticas das lagoas deve-se essencialmente a duas substâncias óticas ativas, sendo o DOM, o DOC e o *Total Suspended Solids* (TSS) (Laurion et al., 2010; Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014).

Breton et al (2009) constatarem a importância de descrever as propriedades físico-químicas, biológicas e óticas das lagoas termocársicas situadas em diferentes áreas de *permafrost* (descontínuo e contínuo) e avaliaram como essas propriedades poderão afetar o seu papel potencial enquanto *hotspots* de GEE. Descobriram que todas as lagoas utilizadas como amostra, tanto no Ártico como no Subártico, encontravam-se sobressaturadas em CH<sub>4</sub>. Tal como Bouchard et al (2011) e Watanabe et al (2011), verificaram a importância de essencialmente duas substâncias óticas ativas presentes nas lagoas termocársicas, nomeadamente o DOM, contribuindo para a absorção da energia e o TSS, contribuindo para a sua dispersão, estando ambas relacionadas com a capacidade de libertação de GEE (relação forte com a respiração e atividade microbiana que modifica o metabolismo do ecossistema). Constataram que o DOM apresenta uma correlação mais forte com o CO<sub>2</sub> comparativamente ao CH<sub>4</sub>. Destacaram, finalmente, a importância de aplicações associadas à DR e à análise espacial, de modo a elevar o conhecimento a diferentes escalas espaciais e temporais, sendo que, segundo os autores, a grande variabilidade observada nas propriedades limnológicas durante a estação de crescimento (verão), impede generalizações sobre o papel das lagoas termocársicas na produção de GEE.

Laurion et al (2010) realizaram o estudo mais aprofundado ao nível da quantificação dos fluxos de GEE por parte das lagoas termocársicas localizadas no Ártico e Subártico Canadano, investigando como as propriedades óticas do reservatório de carbono, o tipo de estruturas microbianas, a luz e os regimes de mistura influenciam a taxa de libertação dos GEE. Focaram a importância das diferentes estações ao longo do ano para os fluxos dos GEE, evidenciando o outono como sendo um período predominantemente crítico e a importância

da influência de certas variáveis meteorológicas, como por exemplo o vento, na alteração do sentido e intensificação desses fluxos. Reforçaram o facto de as lagoas termocársicas apresentarem características limnológicas, morfológicas, físico-químicas e biológicas muito diferenciadas e dinâmicas do ponto de vista temporal (dias, semanas e estações) ao longo de pequenas áreas, sendo que essas características terão de ser consideradas por forma a melhorar as medições dos fluxos de GEE em termos temporais e espaciais, pelo que ressaltam a importância do uso de abordagens assentes em DR.

Bouchard et al (2011) realizaram o primeiro estudo sedimentológico considerando pequenas lagoas termocársicas originadas através da fusão de *palsas* e *lithalsas*. Recorreram à análise de várias lagoas de fusão em KWAK, procurando descrever as propriedades físico-químicas dos sedimentos em lagoas com diferentes propriedades limnológicas; identificar o principal processo controlador da erosão dos sedimentos, transporte e deposição no passado; e avaliar a evolução temporal das lagoas no contexto de mudanças paleoambientais. Constataram, essencialmente, as elevadas concentrações de DOM nas lagoas utilizadas como amostra e discutiram o facto de as suas propriedades óticas terem mudado num passado recente, com a diminuição das taxas de sedimentação, possivelmente devido ao assentamento das partículas de argila e silte (diminuição do TSS) e estabilização das margens pelo desenvolvimento da vegetação terrestre ou aquática (aumento do DOC/DOM), resultando numa transição de cor turbida bege (lagoas mais recentes) para cor escura acastanhada ou amarelada (lagoas mais antigas). Segundo estes autores, a transição das lagoas para cor escura é uma questão essencialmente temporal, tendo em consideração a fase de degradação da *palsa* ou *lithalsa* e o facto de as lagoas serem ou não recentes, pelo que defendem que as suas dinâmicas temporais terão um impacto significativo na intensidade e sentido dos fluxos de carbono. Identificaram ainda que o DOC e o TSS estão fortemente ligados ao processo de iniciação da formação das lagoas termocársicas (degradação de *palsas* e *lithalsas*), como por exemplo através de acumulação de turfa e estabilização do solo pelo desenvolvimento da vegetação, ao invés do que sucede com a composição química geral no longo prazo.

Watanabe et al (2011) desenvolveram um estudo mais aprofundado ao nível das propriedades óticas das lagoas termocársicas e comparação com dados extraídos de imagens de satélite de muito alta resolução do satélite *QuickBird*. À semelhança de Breton et al (2009) e Bouchard et al (2011), demonstraram que as diferenças das cores das lagoas termocársicas são essencialmente atribuídas à variação de concentrações em duas substâncias óticas ativas, nomeadamente o DOM (expresso como DOC, responsável pela absorção espectral) e as partículas suspensas não-algais (semelhante ao TSS, contribuindo para a dispersão e absorção espectral). No caso do TSS, as altas concentrações de partículas finas, como siltes e argilas terão um grande impacto na cor da água.

Ao nível das potencialidades da DR destacam-se essencialmente dois obstáculos para o estudo das lagoas termocársicas, sendo um, financeiro, nomeadamente no que toca aos custos inerentes à aquisição de imagens multiespectrais de muito alta resolução de satélites comerciais; e o outro inerente à melhor resolução espacial de satélites de observação terrestre de utilização gratuita, com especial destaque para a importância dos sensores dos satélites da missão *Landsat* e da missão *Sentinel*.

Vários estudos têm sido desenvolvidos para a identificação e monitorização de lagos e lagoas recorrendo ao uso de imagens de satélite. Polishchuk et al (2015) recorreram à utilização de imagens do satélite *QuickBird* para modelar e prever dinâmicas das emissões de CH<sub>4</sub> nas zonas de *permafrost*, através de funções potenciais e exponenciais, bem como monitorizar áreas de aparecimento e desaparecimento de lagos recorrendo a imagens de satélite *Landsat*. Tian et al (2017) utilizaram imagens de satélite *GaoFen-2* para monitorizar a resposta dos lagos termocársicos ao rápido aquecimento global, com especial destaque para a criação de algoritmos de deteção das dinâmicas na linha de costa. Karlsson et al (2014) recorreram à utilização de imagens multitemporais do satélite *Landsat 1*, *Landsat 4* e *Landsat 5* por forma a investigarem as mudanças temporais na distribuição dos lagos termocársicos no Norte da Sibéria, sendo que a relação entre o tamanho e a abundância dos lagos desempenham um importante papel no ciclo biogeoquímico regional.

Alguns autores já têm explorado as potencialidades dos novos satélites S2, numa ótica de deteção de lagos na superfície terrestre, mas também numa ótica de monitorização dos mesmos (Du et al., 2016; Toming et al., 2016). Na ótica da deteção, Du et al (2016) desenvolveram um índice, chamado MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), tendo em consideração a banda verde e testando vários métodos para *pansharpening* da banda infravermelho de ondas curtas, passando da resolução espacial original de 20 metros para 10 metros, o que segundo os autores oferece um melhor desempenho comparativamente ao NDWI (*Normalized Difference Water Index*). Nesse estudo, os autores não mencionam, no entanto, melhorias associadas à deteção do limiar dimensional mínimo dos lagos ou lagoas, sendo que esse não consistiu um dos objetivos do estudo. Por outro lado, ao nível da monitorização, Toming et al (2016) foram os responsáveis pela realização dos primeiros testes que procederam à utilização de imagens multiespectrais do satélite S2 para o estudo de parâmetros de qualidade da água, como por exemplo a clorofila, a cor da água, o CDOM e o DOC, confrontando com dados de verdade de terreno.

## 2.6. DETECÇÃO DE LAGOS E LAGOAS TERMOCÁRSICAS: A NATUREZA DO PROBLEMA

A principal questão para a qual pretendemos contribuir no âmbito desta dissertação, relaciona-se com a ausência na representação de lagoas com dimensão  $< 10.000 \text{ m}^2$ , em modelos climáticos e do ciclo de carbono, locais, regionais e globais (Muster et al., 2013; Bouchard et al., 2014; Verpoorter et al., 2014; Pekel et al., 2016; Muster et al., 2017). Um importante passo para a sua inclusão será a sua inventariação detalhada a nível global.

Lehner & Doll (2004) enumeraram as bases de dados geográficas de corpos de água interiores existentes até ao final do século XX. As bases de dados referiam-se essencialmente a pontos com localização (longitude e latitude) sem delimitação das linhas de costa e espelhavam debilidades do ponto de vista da DR e tratamento de imagens. A base de dados da *Global Lakes and Wetlands Database* (GLWD) foi das primeiras a realizar a delimitação através de polígonos de grandes lagos e reservatórios, bem como pequenos corpos de água e pântanos a nível global. A GLWD foi desenvolvida através de uma parceria entre a *World Wildlife Fund* (WWF), e o Centro de Pesquisa em Sistemas Ambientais da Universidade de Kassel (Alemanha) tendo como base os melhores mapas, dados e informações disponíveis relativas a lagos e zonas húmidas a uma escala global de 1:3 milhões a 1:1 milhão (World Wildlife Fund, 2018). A base de dados é composta essencialmente por três níveis de informação geográfica, sendo que foram desenvolvidos para serem utilizados em modelos hidrológicos globais, com o objetivo de melhorar cálculos de evapotranspiração e regimes de fluxos laterais (Lehner & Doll, 2004). No início do século XXI, devido à melhoria da resolução da informação de base utilizada, a base de dados da GLWD foi capaz de melhorar o entendimento de fenómenos relativos à distribuição de corpos de água (naturais e artificiais) e demais complexos pantanosos existentes a nível global, refinando e validando vários modelos existentes até à data (fig. 8).

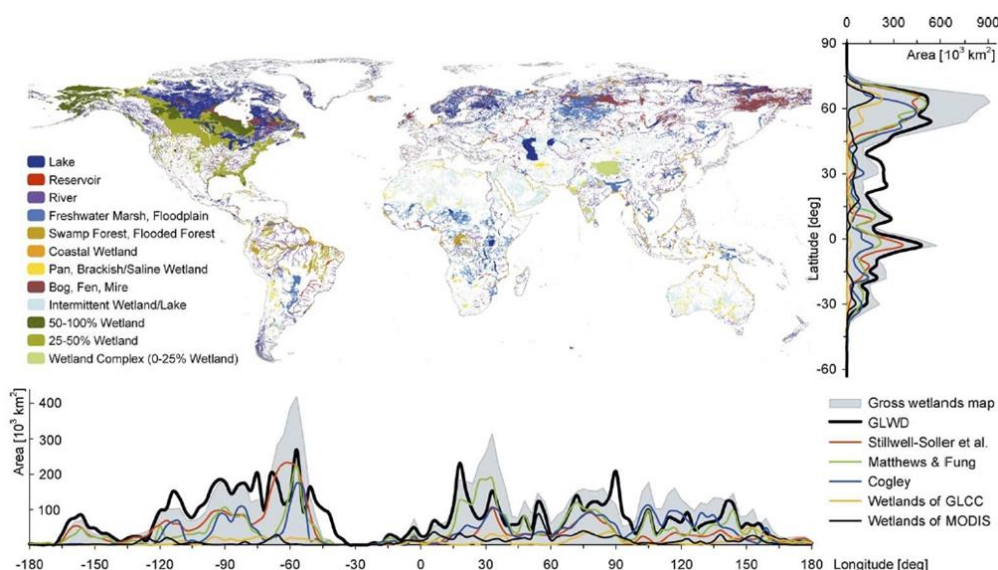


Figura 8: Pântanos globais da base de dados da GLWD (nível 3), com a distribuição latitudinal e longitudinal das áreas pantanosas e comparação com outros modelos globais até ao final do século XX (Lehner & Doll, 2004)

Apesar dos esforços para a realização da GLWD, até ao início do século XXI existiam várias limitações relacionadas com as metodologias utilizadas, resolução da informação e sensores de base utilizados, bem como capacidade de processamento dos computadores e demais programas computacionais. Como resultado, na base de dados da GLWD, lagos e lagoas de dimensão inferior aos 100 000 m<sup>2</sup> são tipicamente omitidos(as) sendo que não estariam contemplados(as) na informação de base utilizada.

Verpoorter et al (2014) desenvolveram uma base de dados de alta resolução tendo como base o algoritmo GWEM (*GeoCover<sup>TM</sup> Water bodies Extraction Method*) com o objetivo de responder à questão: “Quantos lagos existem na Terra?”. A base de dados desenvolvida refere-se à *GLObal WAter BOdies database* (GLOWABO). Para a realização desta base de dados, os autores procederam à utilização de imagens do satélite *Landsat 7* de cerca de três anos (8500 cenas), nomeadamente considerando um mosaico global de imagens sem influência de nuvens e com *pansharpening* para resolução espacial de 14.25 metros (*GeoCover<sup>TM</sup> circa 2000*). A abordagem metodológica desenvolvida neste estudo permitiu a identificação da existência de cerca de 117 milhões de lagos e lagoas com dimensão superior a 2 000 m<sup>2</sup> (limiar mínimo) e a verificação de um conjunto de debilidades face aos estudos de abordagens estatísticas assentes em extrapolações. Relativamente aos estudos de extrapolações, a base de dados GLOWABO verificou a existência de concordância no que se refere à maior concentração, área e perímetro dos corpos de água nas latitudes da floresta boreal e tundra (Ártico e Subártico), entre os 45° e 75°N, mas identifica a existência de 117 milhões de lagos e lagoas com dimensão superior a 2 000 m<sup>2</sup>, enquanto estudos de extrapolação estatística identificam a existência de 163 milhões, representando uma sobrestimação de 46 milhões de lagos. Para além desta sobrestimação, alguns destes estudos indicariam ainda a dominância de pequenos lagos relativamente à extensão global dos lagos existentes, sendo que a base de dados da GLOWABO, demonstrou que a extensão global dos lagos existentes é dominada por lagos médios e grandes.

Apesar da alta resolução conseguida através da implementação da base de dados GLOWABO, verificou-se a inexistência de uma página de internet de onde se pudesse realizar o descarregamento dos dados, não tendo sido descobertos quaisquer mapas ou portais de WebSIG relativos à concreta localização dos lagos. O aspeto relativo à sua localização refere-se sobretudo à sua latitude (Verpoorter et al., 2014). Para além desses factos, vários autores têm relatado alterações rápidas no número de lagos e lagoas existentes na superfície terrestre, sendo que essas mudanças podem refletir características importantes relativas a processos geomorfológicos, hidrológicos e biogeoquímicos regionais (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010; Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014). A base de dados da GLOWABO é derivada de uma cena estática de imagens, não sendo, por isso, capaz de detetar quaisquer mudanças na evolução dos lagos e lagoas. Este constitui o principal obstáculo desta base de dados.

Atualmente a base de dados global mais avançada e completa do ponto de vista da deteção, mapeamento e monitorização de corpos de água existentes há superfície terrestre é a *Global Surface Water Explorer* (GSWE). Esta base de dados foi criada tendo como base três milhões de imagens *Landsat*, com resolução espacial de 30 metros, por forma a detetar e quantificar mudanças nas superfícies de água a um



nível global, ao longo de 32 anos (Pekel et al., 2016). A GSWE permitiu de sobremaneira elevar o entendimento relativo à distribuição e dinâmica dos corpos de água existentes na superfície terrestre e comprovar a eficácia de técnicas de processamento e classificação de imagens obtidas através de sensores instalados em satélites. Cada pixel num conjunto de 1 823 *terabytes* de dados *Landsat* foi classificado como água aberta, terra ou como não válido, utilizando um sistema baseado em inteligência artificial (Pekel et al., 2016). A GSWE revelou-se capaz, não só de melhorar a localização e delimitação dos corpos de água (fig. 9 – A), como também de ajudar no que toca à interpretação da perda de corpos de água permanentes e sazonais a um nível global (fig. 9 – B). A presença ou ausência de água e os períodos em que tal ocorre influenciam o sistema climático e demais modelos de circulação, como também as emissões de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> (Pekel et al., 2016).

A avaliação do desempenho de qualidade da base de dados GSWE foi realizada tendo em consideração 40 000 pontos de referência e confirmou a existência de menos de 1% de dados falsos positivos (corpos de água detetados que não se referiam a corpos de água) e 5% de dados falsos negativos (corpos de água não classificados que se referiam a corpos de água) (Pekel et al., 2016).

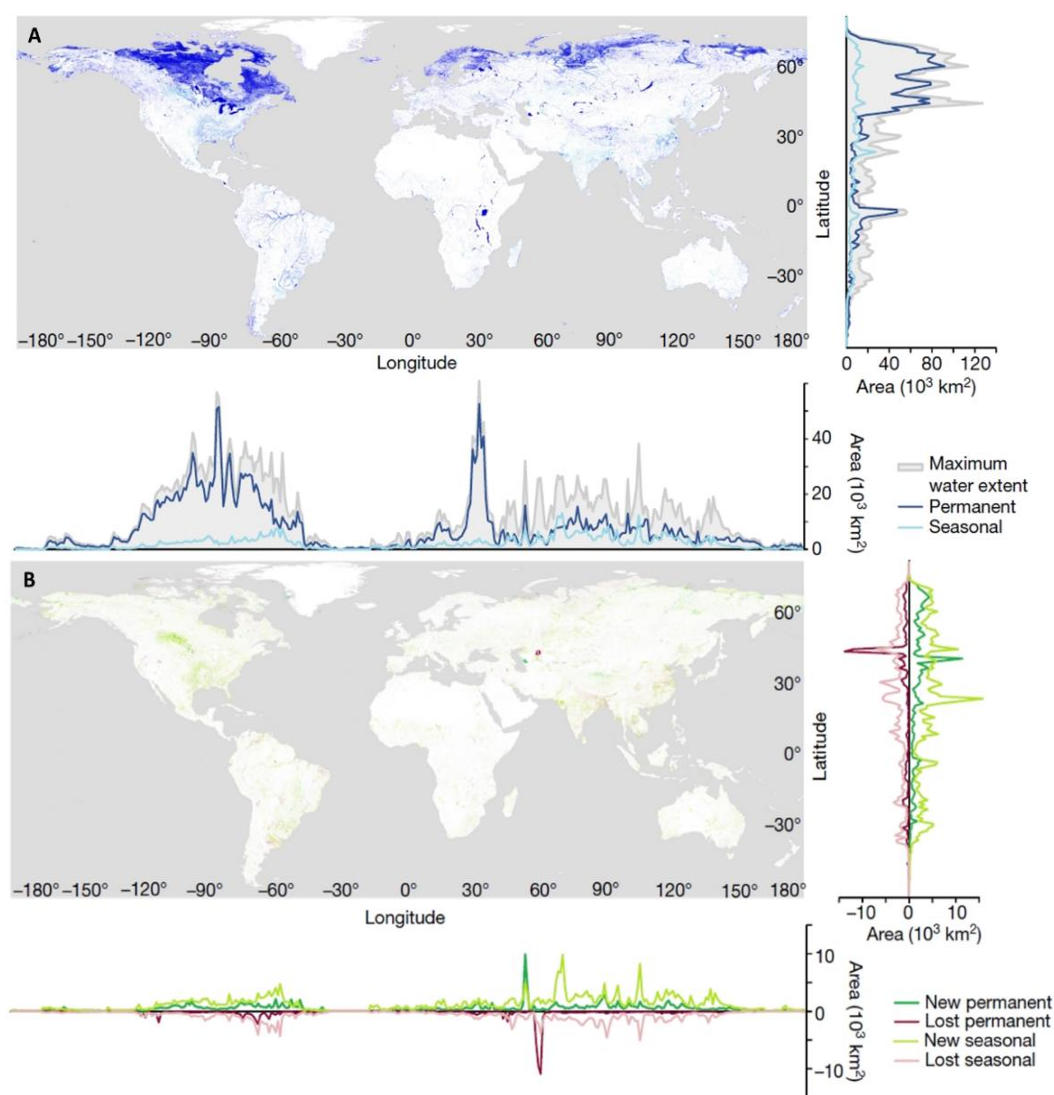


Figura 9: Distribuição e mudanças dos corpos de água na superfície terrestre, (A) considerando a máxima extensão de água, ocorrência permanente e sazonal de outubro de 2014 a outubro de 2015 e (B) perdas e ganhos em superfícies de água permanentes e sazonais entre 1984 e 2015 (Pekel et al., 2016)

A existência da GSWE só se tornou possível através do processamento de algoritmos no *Google Earth Engine* (GEE). O GEE é uma plataforma baseada na nuvem, capaz de processar uma enorme quantidade de dados geoespaciais (*petabytes*) para a realização de análises e derivação de resultados a uma escala planetária, apta para usufruir do poder computacional da *Google*, considerando o funcionamento de vários computadores em paralelo, para atender às necessidades ao nível da compreensão de alguns dos maiores problemas da sociedade, relacionados com a desflorestação, secas, desastres, segurança alimentar, gestão de recursos hídricos, monitorização climática e proteção ambiental (Gorelick et al., 2017). O catálogo de dados público disponível, inclui observações de vários satélites e sistemas de imagens aéreas provenientes de sensores óticos e não-óticos, variáveis ambientais, previsões meteorológicas e climáticas, mapas de cobertura do solo, mapas topográficos e dados socioeconómicos, pré-processados e prontos a utilizar (Gorelick et al., 2017).

Para além de bases de dados globais, o projeto *PeRL* surge com a ambição de colmatar algumas insuficiências relativas ao mapeamento de lagoas no Ártico (Muster, et al., 2017). Esta base de dados parte do pressuposto que os corpos de água estão relacionados com as paisagens regionais de *permafrost* fornecendo informação ao nível da sua extensão, volume de gelo no solo, geologia e litologia, sendo possível a extrapolação estatística dos lagos e lagoas através da utilização de áreas de estudo como amostras em várias unidades de paisagens de *permafrost*. Esta base de dados não se encontra, no entanto, finalizada, sendo que carece de mais dados de alta resolução ( $\leq 6$  metros) de vastas áreas em relação a pequenos corpos de água, especialmente nas regiões de planícies do Canadá e de floresta boreal da Rússia.

Em suma, verifica-se que conjuntos de dados globais documentam a localização e sazonalidade das águas superficiais, sendo produzidos essencialmente a partir de inventários e descrições nacionais, extrapolação estatística de dados regionais e imagens de satélite, mas a contabilização de mudanças a longo prazo em alta resolução (ou superior) continua a ser um desafio (Verpoorter et al., 2014; Pekel et al., 2016). Verpoorter et al (2014) defendem ainda que, devido à escala temporal de dados necessária para a aquisição de um mosaico mundial livre de nuvens, análises regionais serão mais apropriadas para avaliar mudanças no número de lagos e demais processos geomorfológicos e biogeoquímicos associados. Destaca-se ainda a evidenciação de erros por parte de vários autores, tendo em consideração bases de dados que partem de extrapolações estatísticas.

## CAPÍTULO 3 – ENQUADRAMENTO REGIONAL E ÁREAS DE ESTUDO

### 3.1. ENQUADRAMENTO REGIONAL (KUUIJUARAPIK – UMIUJAQ)

A região que compreende as áreas de estudo, está localizada no Subártico Canadiano (Norte do Quebec), na zona de transição entre *permafrost* descontínuo e esporádico, como também entre tundra e floresta boreal e entre as nações *Cree* e *Inuit* (Payette et al., 2004; Vallée & Payette, 2007; Bhiry, et al., 2011) (fig.10). Nesta região, rápidas mudanças sociais e ambientais têm sido verificadas desde 1950 estando, em parte, relacionadas com as alterações climáticas (Bhiry et al., 2011).

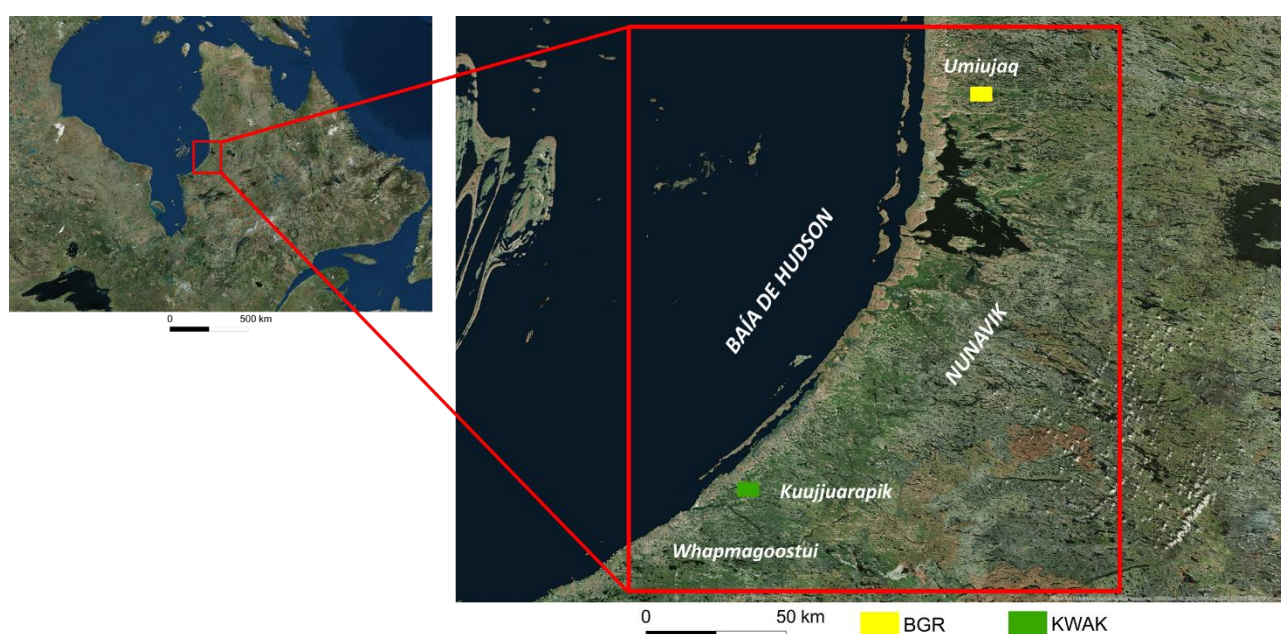


Figura 10: Localização das áreas de estudo BGR e KWAK no Subártico Canadiano a Norte do Quebec (ArcGis Online World Imagery)

O clima é subártico com uma precipitação média anual que ronda os 650 mm, sendo 40% sob a forma de neve (Bhiry et al., 2011). O mês de janeiro é o mais frio, com uma temperatura média próxima dos -20 °C e agosto, o mais quente, com cerca de 11 °C. O índice de congelamento do ar (número cumulativo de graus-dias inferiores a 0 °C) é duas vezes superior ao índice de descongelamento do ar (número de graus-dias superior a 0 °C) (Bouchard et al., 2011). O período sem congelação (temperatura mínima diária > 0°C) é de 126 dias e a estação de crescimento da vegetação estende-se desde meio de maio até ao final de setembro (Bouchard et al., 2014). A direção do vento varia sazonalmente, sendo predominantemente do quadrante este e sudeste no outono e inverno e nordeste no verão e primavera. O vento é um fator importante para a distribuição e compactação da cobertura de neve, bem como, para a distribuição do *permafrost* e da vegetação (Bhiry et al., 2011).

A região leste da Baía de Hudson apresenta uma das mais elevadas taxas de levantamento glaciostático do mundo (1,1 metros por século) devido à regressão do glaciar Laurentino há sensivelmente 8000 cal yr BP,

que esculpiu as rochas graníticas e gnaisses originando relevos de fraca altitude e declive (Bhiry et al., 2011; Bouchard et al., 2011) (fig. 11). A deglaciação foi acompanhada por uma transgressão marinha, com submersão até 250 a 300 metros de altitude. Seguiu-se a sucessiva regressão pós-glaciária do mar de Tyrrell (percursor da Baía de Hudson), há cerca de 7900 cal yr BP, responsável pela deposição de sedimentos marinhos de argila, silte e areais litorais, em depressões (Bhiry et al., 2011; Bouchard et al., 2014).

Os últimos mil anos representam a idade máxima para o início de muitas formas e processos terrestres em altitudes inferiores a 250 metros ao longo da região costeira, incluindo processos periglaciários, formação de *permafrost*, desenvolvimento de turfa, formação de solos, processos eólicos, isolamento de bacias lacustres e colonização por parte da vegetação (Bhiry et al., 2011).



Figura 11: Zona de transição tundra-floresta sobre rochas graníticas e gnaisses esculpidos pelos glaciares há 8 000 anos (Kuujuarapik – Umiujaq)

Há sensivelmente 200-300 anos, no final da Pequena Idade do Gelo, a fusão do *permafrost* instalou-se devido ao aumento da temperatura (Payette et al., 2004; Bhiry et al., 2011; McManus et al., 2012; Ropars & Boudreau 2012; Tremblay et al., 2012), favorecendo a degradação de *palsas* e *lithalsas* e iniciando-se a formação de lagos e lagoas termocársicas (Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014; Beck et al., 2015).

A formação das lagoas termocársicas na área de *permafrost* descontínuo do Subártico do Norte do Quebec, ocorre essencialmente sobre um substrato caracterizado por siltes marinhas, tornando o solo por baixo das lagoas predominantemente impermeável (Breton et al., 2009; Vincent 2009; Bouchard et al., 2014). Este fator contribui para a não drenagem das lagoas até mesmo depois do desaparecimento total do *permafrost*, embora o seu encolhimento morfológico possa ser verificado devido à colonização limítrofe intensa por parte de vegetação terrestre e aquática (Breton et al., 2009; Bouchard et al., 2011).

As alterações no regime de neve e gelo na Baía de Hudson têm alterado de forma significativa o clima regional (Bhiry et al., 2011). No inverno, quando a Baía congela, entre janeiro e maio, o clima assume um cariz de tipo continental, sendo caracterizado essencialmente por temperaturas baixas, pouca precipitação e reduzida nebulosidade, sendo que no verão o clima assume um cariz de tipo marítimo (Bhiry et al., 2011). No entanto, desde 1950 que se tem verificado um aumento das temperaturas do ar e do solo e da precipitação

(fig. 12), a par da redução de gelo marinho ao longo da costa este da Baía de Hudson, contribuindo ainda mais para a redução das áreas de *permafrost* ao longo de um gradiente latitudinal, sendo a redução de 25% (58°N) a mais de 80% (56°N) (Payette et al., 2004; Vallée & Payette, 2007; Hachem et al., 2009; Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014).

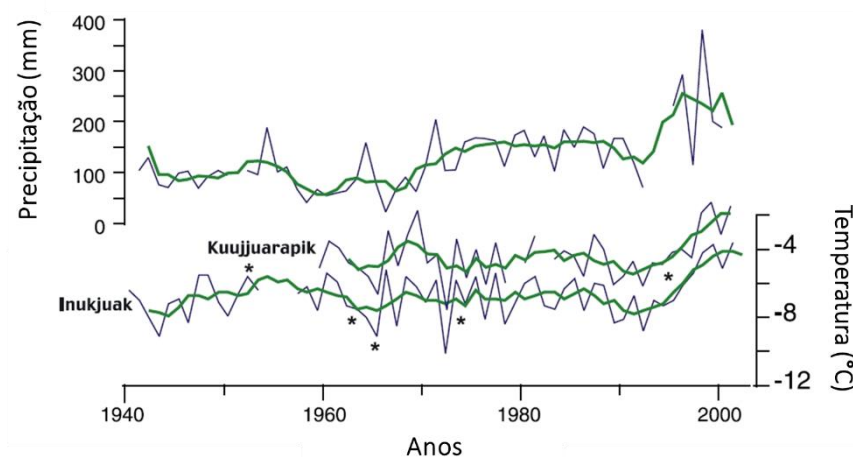


Figura 12: Dados de precipitação da estação meteorológica de Inukjuak (58°N) e dados de temperatura das estações meteorológicas de Inukjuak e Kuujjuarapik (55°N) de 1940 a 2003 (Adaptado de Payette et al., 2004)

O aumento da temperatura e as alterações no regime de neve e gelo têm ainda potenciado tendências associadas à expansão de determinadas comunidades arbóreas e arbustivas para norte do limite de árvores (McManus et al., 2012; Tremblay et al., 2012; Beck et al., 2015), embora esse processo não seja linear devido à existência de constrangimentos ecológicos e topográficos locais (Dufour-Tremblay et al., 2012; Ropars & Boudreau, 2012).



### 3.2. A ÁREA DE ESTUDO DE BGR

A área de estudo identificada como BGR está localizada no vale do rio Sheldrake a cerca de 20 quilómetros a leste da vila de Umiujaq, numa área de *permafrost* descontínuo (55°19'N; 77°30'O). No âmbito desta dissertação, esta área de estudo apresenta duas áreas de trabalho complementares: uma área de verdade de terreno, sendo menos extensa (576 987 m<sup>2</sup> – BGR); e uma área de teste regional, sendo mais extensa (25 km<sup>2</sup> – Vale de BGR). A área de verdade de terreno encontra-se englobada na área de teste regional (fig. 13).

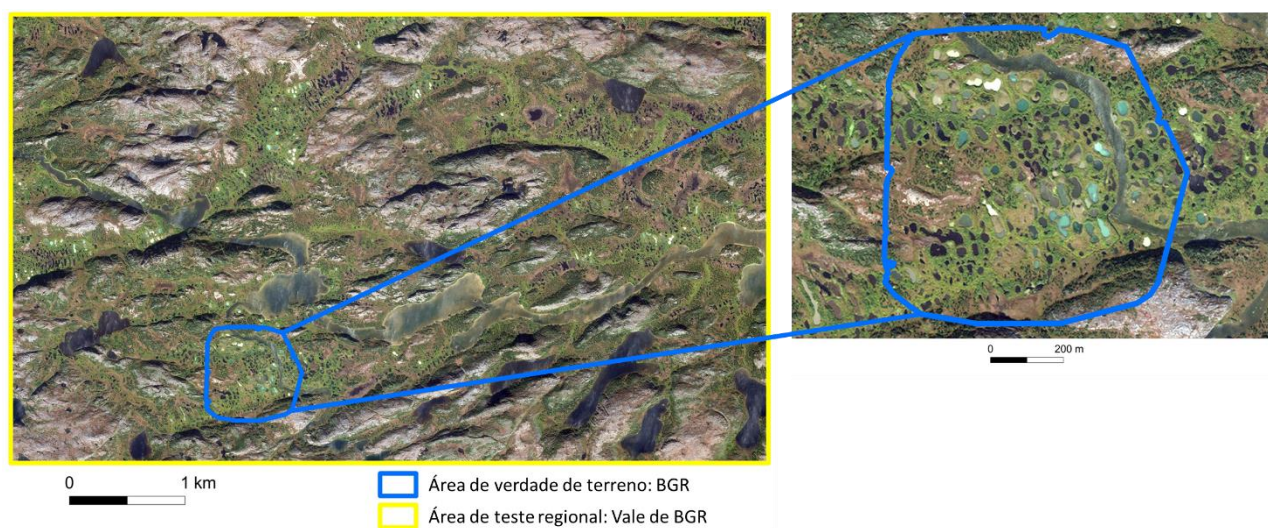


Figura 13: Enquadramento da área de verdade de terreno (BGR) na área de teste regional (Vale de BGR) num compósito de cor verdadeira de imagens *WorldView 2* (11/09/2017)

A par da fusão do *permafrost*, acompanhada da degradação das *lithalsas*, ocorreu a formação de um grande número de lagos e lagoas termocársicas. A sua morfologia evoluiu essencialmente de formas muito variadas numa fase inicial, para uma forma predominantemente circular consoante as diferentes fases de degradação das *lithalsas* (Bégin & Vincent, 2017). As lagoas de fusão apresentam uma enorme variedade de propriedades óticas, relacionadas com as suas propriedades limnológicas e sedimentológicas, bem como com os estágios de desenvolvimento (Breton et al., 2009).

### 3.3. A ÁREA DE ESTUDO DE KWAK

A área de estudo relativa a KWAK está localizada no vale do rio Kwakwatanikapistikw a cerca de 16 quilómetros a noroeste da vila de Kuujjuarapik-Whapmagoostui, na zona de *permafrost* esporádico (55°19'N; 77°30'O). À semelhança de BGR, no âmbito desta dissertação, a área de estudo de KWAK apresenta duas áreas de trabalho complementares: uma área de verdade de terreno, sendo menos extensa (468 991 m<sup>2</sup> – KWAK); e uma área de teste regional, sendo mais extensa (25 km<sup>2</sup> – vale de KWAK). A área de verdade de terreno encontra-se englobada na área de teste regional (fig. 14).

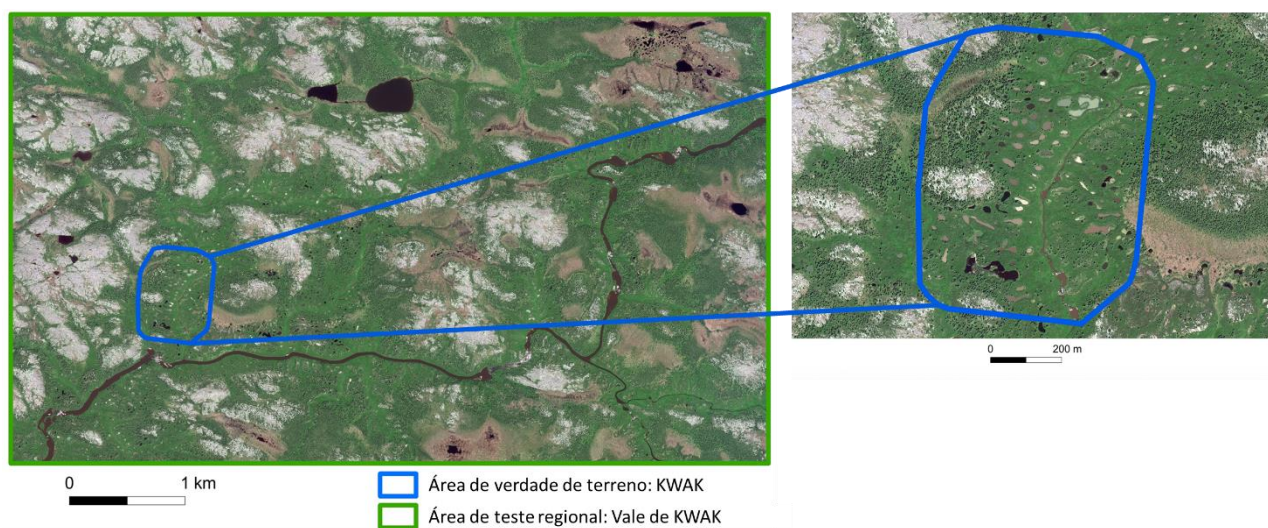


Figura 14: Enquadramento da área de verdade de terreno (KWAK) na área de teste regional (Vale de KWAK) num compósito de cor verdadeira de imagens *WorldView 4* (29/07/2017)

A área de estudo é identificada como sendo uma área com termocarso, desenvolvida sobre depósitos de silte e argila marinhos, que se apresenta num estado avançado de degradação (Bouchard et al., 2014). A fusão do permafrost originou a degradação de *lithalsas* e consequentemente formaram-se uma série de lagoas termocársicas com propriedades limnológicas e sedimentológicas distintas, sendo predominantemente circulares (10 a 30 metros de diâmetro) e pouco profundas (1 a 3,5 metros de profundidade) (Bouchard et al., 2014).

A área de estudo de KWAK tem registado uma rápida evolução da paisagem, com a degradação de *palsas* e *lithalsas*, expansão das lagoas termocársicas, bem como rápidos processos de arbustização (McManus et al., 2012; Ropars & Boudreau, 2012; Tremblay et al., 2012) e terrestrialização com o desenvolvimento de comunidades arbustivas densas e arbóreas, bem como acumulação de turfa (Payette, et al., 2004; Bouchard, et al., 2014). Segundo Bouchard et al (2014), em 50 anos a área de estudo KWAK apresentou uma diminuição do permafrost de 96%, com um aumento da vegetação arbórea em 327%, diminuição da área total ocupada por lagoas termocársicas de 2,5% e diminuição do número de lagoas de 107 para 79.

As margens das lagoas termocársicas encontram-se rodeadas por uma cobertura vegetal tipicamente associada à zona de floresta-tundra do Subártico do Quebec, nomeadamente por arbustos (*Salix planifolia*, *Salix glauca*, *Alnus viridis* e *Myrica gale*) e por uma população esparsa de arbustos e árvores *Picea mariana*, *Picea glauca*, *Larix laricina*, *Rhododendron groenlandicum* e *Betula glandulosa*, bem como musgos *Sphagnum* spp. e gramíneas (*Carex aquatilis*) (Bouchard et al., 2011; Bouchard et al., 2014; Bégin & Vincent, 2017). A *Betula glandulosa* é uma das espécies mais apta às novas condições abióticas em áreas do Subártico que têm registado aumento da temperatura do ar e do solo (Paradis et al., 2014; Ropars & Boudreau, 2012; Tremblay, et al., 2012).



## CAPÍTULO 4 – MÉTODOS E TÉCNICAS

### 4.1. INTRODUÇÃO

A DR através da aquisição, processamento e tratamento de imagens provenientes de sensores de baixa, média, alta, muito alta e ultra alta resolução pode contribuir para detetar e delimitar lagos e lagoas termocársicas presentes na superfície terrestre e consequentemente extrair variáveis importantes para a sua monitorização, sobretudo relativas às suas características espectrais, formas e texturas (Tian et al., 2017). Essas variáveis podem ser utilizadas como proxies para modelação dos fluxos dos GEE e *input* para modelos climáticos (Breton et al., 2009). A utilização de SIG, torna possível a modelação desses fluxos a diferentes escalas, relacionando com outras variáveis ambientais e climáticas condicionantes e percebendo a sua influência do nível local ao nível regional e global (Watanabe et al., 2011). Os SIG e a DR têm apresentado uma relação cada vez mais forte e próxima com o passar do tempo (Esri Press, 2016).

O aumento da disponibilidade e declínio dos preços associados a imagens de satélite de alta resolução, melhorias relativas à disponibilidade de imagens de satélite de média resolução potenciando análises a longo prazo (por exemplo o Programa *Landsat* do Centro de Serviços Geológicos dos Estados Unidos e o Programa *Copernicus* da Agência Espacial Europeia) e o desenvolvimento de técnicas de processamento e tratamento das imagens, têm promovido o estudo de áreas onde o *permafrost* se encontra em estado de degradação, de uma forma cada vez mais eficiente (Kokelj & Jorgenson, 2013). Destaca-se ainda, mais recentemente, a utilização de VANTS e o desenvolvimento de programas *Structure from Motion* (criação de estrutura através do movimento), bem como câmaras de muito alta e ultra alta resolução, multiespectrais e hiperespectrais, permitindo o aumento do conhecimento relativo às lagoas termocársicas e às alterações dos ecossistemas terrestres.

A metodologia adotada no decorrer desta dissertação baseou-se em duas áreas de trabalho complementares, nomeadamente numa área de verdade de terreno e uma área de teste regional, para ambas as áreas de estudo (KWAK e BGR), cujas características foram analisadas recorrendo a diferentes sensores de deteção remota (fig. 15).

A área de verdade de terreno corresponde às áreas abrangidas pelos planos de voo realizados pelo VANT em cada área de estudo (KWAK e BGR). A realização dos planos de voo permitiu a derivação de um conjunto de quatro ortomosaicos multiespectrais, através de *Structure from Motion*, tendo como base fotografias aéreas, capturadas com uma câmara multiespectral Sequoia. Estes dados de muito alta resolução, são considerados como dados de verdade de terreno ao longo desta dissertação e correspondem aos limites dimensionais e valores de reflectância das lagoas termocársicas, tendo em consideração quatro bandas multiespectrais: verde, vermelho, limite do vermelho (*red edge*) e infravermelho próximo.

O VANT e a câmara multiespectral Sequoia são instrumentos poderosos para a medição dos valores de reflectância, devido a fatores como, a proximidade do sensor aos objetos presentes na superfície terrestre minimizando a influência de efeitos atmosféricos, como poeiras, aerossóis e vapor de água, bem como devido à flexibilidade relativa à implementação de um plano de voo sobre áreas de difícil acesso, como por exemplo, as turfeiras, áreas de estudo de primordial foco no decorrer desta dissertação (Assmann et al., 2018).

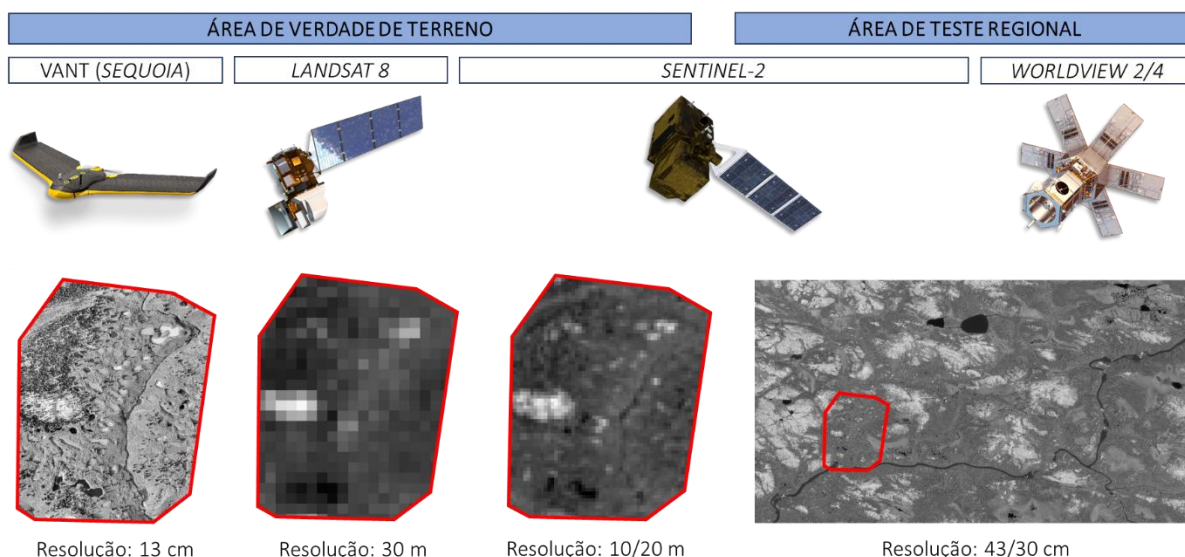


Figura 15: Áreas de trabalho complementares (área de verdade de terreno e área de teste regional) e sensores utilizados

A área de teste regional, corresponde a uma área mais ampla ( $25 \text{ km}^2$ ), comparativamente à área relativa ao plano de voo realizado pelo VANT. Em BGR esta área enquadra-se ao longo do vale do rio Sheldrake (Vale de BGR) e em KWAK ao longo do vale do rio Kwakwatanikapistikw (Vale de KWAK). Assim, procurou-se perceber a distribuição dos lagos e lagoas presentes numa área mais abrangente, recorrendo-se à utilização de imagens de muito alta resolução WV 2 (Vale de BGR) e WV 4 (Vale de KWAK) para a sua delineação.

Utilizaram-se os dados de reflectância provenientes do VANT (área de verdade de terreno) para confrontar com os dados de reflectância provenientes das imagens de satélite L8 e S2, de datas próximas ao trabalho de campo, através da realização de correlações de *Pearson* (fig. 16). Para além das características entre as bandas dos diferentes sensores não serem exatamente as mesmas, facto que introduziu diferenças nos valores de reflectância desde o início, no decorrer deste processo, seguiu-se como assunção a não existência de diferenças significativas entre a reflectância medida em datas diferentes, embora que próximas, e também em diferentes horas do dia. Esta revelou ser a única abordagem possível dadas as limitações associadas à logística de trabalho de campo e estados do tempo.

Os valores de reflectância para os lagos e lagoas foram obtidos através de vários métodos, recorrendo-se a medidas estatísticas descritivas de dispersão e posição. Na área de verdade de terreno, o confronto entre os valores de reflectância das lagoas termocársicas foi realizado com o objetivo de se identificar o limiar mínimo dimensional a partir do qual as imagens de cada sensor de satélite (S2 e L8) podem ser utilizadas para a caracterização espectral das lagoas, bem como perceber a influência que as sombras projetadas por árvores

e arbustos altos e densos exercem na alteração dos valores de reflectância dos píxeis, através da introdução de misturas espectrais.

Uma vez verificadas as potencialidades introduzidas pelos sensores dos satélites L8 e S2, procedeu-se à utilização das imagens multiespectrais do melhor sensor, corretamente calibradas em termos radiométricos, geométricos e atmosféricos, durante um período temporal de um ano, antes do trabalho de campo (de 31 de agosto de 2017 a 31 de agosto de 2016), para a monitorização das características espectrais intra-aneais dos lagos e lagoas presentes nas áreas de teste regional. Alargou-se este período temporal para o Vale de BGR, devido à influência das nuvens e conseguinte fraca disponibilidade de imagens. No entanto, constatou-se a existência de apenas três imagens multiespectrais livres de nuvens e sem influência de neve, o que impossibilitou a realização de uma análise rica relativa às dinâmicas das características espectrais dos lagos e lagoas nesta área de teste regional.

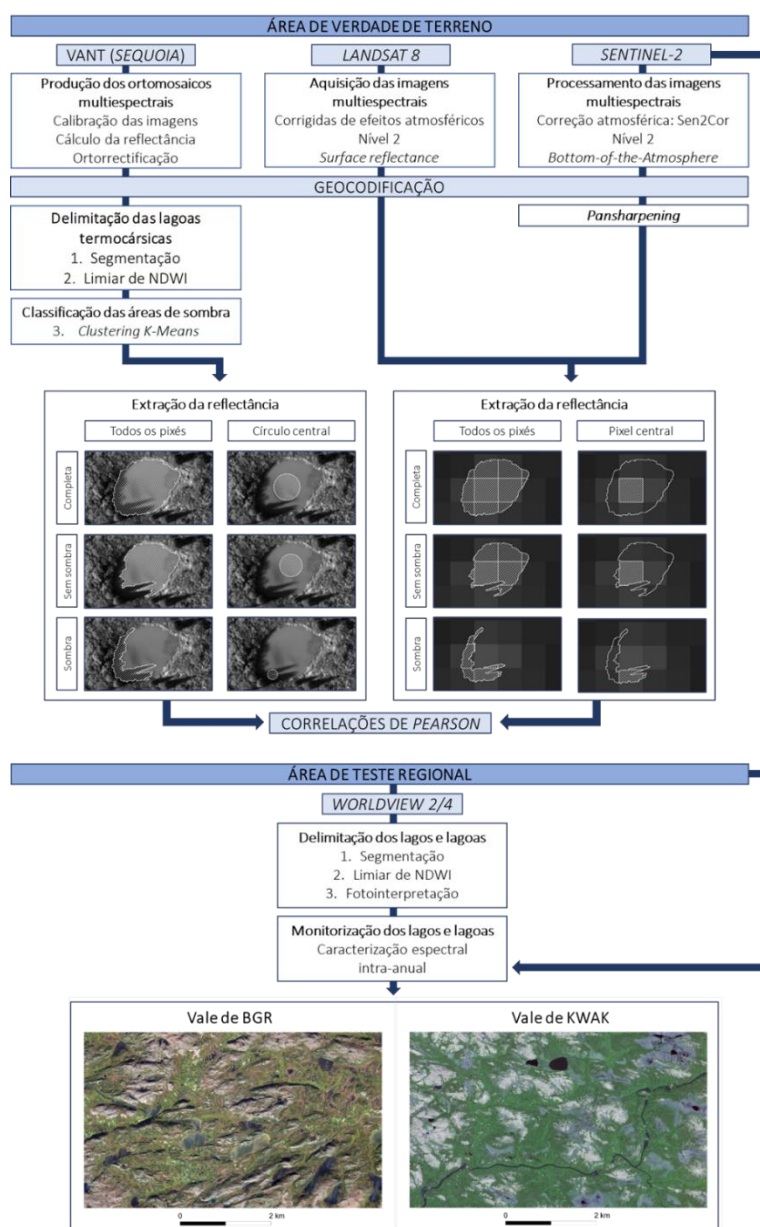


Figura 16: Metodologia para a avaliação da qualidade das imagens de satélite e monitorização das mudanças espectrais nas lagoas termocárcicas

## 4.2. TRABALHO DE CAMPO E DE VERDADE DE TERRENO (BGR E KWAK)

### 4.2.1. CARACTERÍSTICAS DOS PLANOS DE VOO

Realizaram-se as campanhas de terreno no dia 31 de agosto de 2017 às 16 horas locais em BGR e no dia 1 de setembro de 2017 às 17 horas locais em KWAK. Para ambas as áreas de estudo utilizou-se como modo de transporte um helicóptero. Aquando da chegada às áreas de estudo, procedeu-se à utilização de um VANT *Sensefly eBee*, com uma câmara multiespectral *Sequoia* de muito alta resolução para captação de fotografias aéreas (fig. 17).



Figura 17: VANT utilizado para o trabalho de campo com câmara multiespectral *Sequoia* e respetivo sensor de irradiância

A altura do voo do VANT de 120 metros, permitiu a obtenção de dados, por parte da câmara multiespectral *Sequoia*, com uma resolução espacial muito alta (13 centímetros). Esta câmara dispõe de quatro bandas: verde, vermelho, limite do vermelho e infravermelho próximo (tabela 2). Como resultado das suas características espectrais, esta câmara está muito direcionada para a caracterização e mapeamento de comunidades vegetais, com especial destaque para projetos agrícolas de precisão (Parrot Sequoia, 2016). Dispõe de um sensor de irradiância de alta precisão, que permite a calibração radiométrica dos ortomosaicos, tendo em consideração a radiação solar incidente, momentos antes da captação das fotografias aéreas, através de um alvo de calibração. O sensor permite a comparação e análise de fotografias capturadas em diferentes condições de iluminação, nomeadamente relativas a diferentes voos, datas e condições meteorológicas, ao realizar a normalização dos valores de reflectância e procurar minimizar pixéis saturados (Pix4D, 2017). Assim, recolhe os comportamentos espectrais dos objetos presentes na superfície terrestre de forma precisa, aliada à sua alta resolução espacial.

Tabela 2: Banda, valor máximo e mínimo da banda e sua largura (nanômetros – nm) da câmara multiespectral *Sequoia*

| Banda                 | Comprimento de onda máximo e mínimo (nm) | Largura da banda (nm) |
|-----------------------|--|-----------------------|
| Verde                 | 530 – 570                                | 40                    |
| Vermelho              | 640 – 680                                | 40                    |
| Limite do vermelho    | 730 – 740                                | 10                    |
| Infravermelho próximo | 770 – 810                                | 40                    |

(Parrot Sequoia, 2016)

A relação (linha empírica) entre os Números Digitais da imagem e os valores de reflectância da superfície, é estabelecida a partir de uma amostra de píxeis que cobrem áreas de reflectância conhecida. Teoricamente deveria proceder-se à utilização de um espectrómetro para medição desses valores de reflectância sobre uma área homogênea natural localizada dentro da área de estudo. No entanto, padrões artificiais, os chamados alvos de calibração ou alvos de reflectância conhecida, são vulgarmente utilizados para a realização da calibração (Assmann et al., 2018). Considerando os recursos disponíveis, adotou-se esta como sendo a solução para esta dissertação.

O alvo de calibração utilizado consiste num cartão de balanço do branco, o que permite que a câmara obtenha o valor de albedo para cada material e para cada banda (Pix4D, 2018). Antes dos voos, procedeu-se à captação de fotografias sobre esse alvo. Um cuidado a ter aquando da sua captação tem que ver com a posição e orientação do VANT e do alvo. A câmara deve apresentar uma distância de cerca de 50 centímetros face ao alvo e não devem existir sombras, nem sobre o alvo, nem sobre o sensor. O operador não deve ainda apresentar-se vestido com roupas brilhantes ou claras, por forma a não manipular o sinal recebido pelo sensor (Assmann et al., 2018). Introduziram-se as fotografias captadas sobre esse alvo no programa *Pix4Dmapper* por forma a calibrar os ortomosaicos de cada banda (fig. 18).

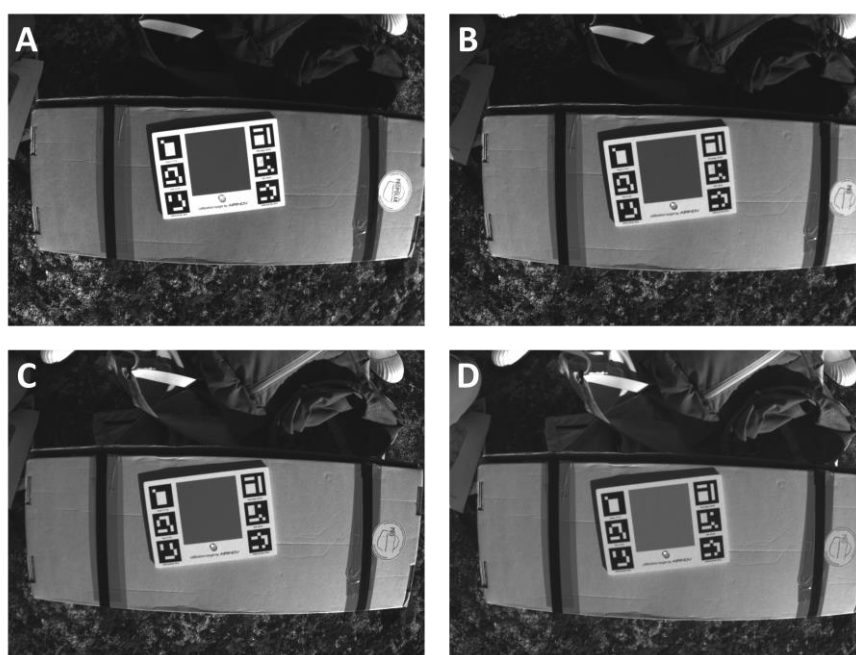


Figura 18: Exemplos de fotografias obtidas com a câmara multiespectral *Sequoia* sobre o alvo de calibração (A – verde, B – vermelho, C – limite do vermelho e D – infravermelho próximo)



Uma exigência a considerar aquando do uso de câmaras multiespectrais em VANTS tem que ver com a disponibilidade de baterias e com a capacidade do cartão de memória utilizado, uma vez que estas câmaras consomem mais energia e mais memória comparativamente às câmaras normais (RGB de cor verdadeira). Ao contrário das câmaras normais, esta câmara multiespectral captura cinco fotografias em cada localização ao invés de uma, sendo uma fotografia relativa a um compósito de cor verdadeira (RGB) e as restantes quatro relativas às bandas multiespectrais. Como tal, regra geral, os voos têm de ser mais curtos e apresentar fiadas mais espaçadas. Tais exigências podem refletir-se na qualidade de sobreposição (mínima de 75%) e aquisição das fotografias aéreas, com repercussões diretas na qualidade dos ortomosaicos e modelos em 3D (senseFly, 2017; Assmann et al., 2018).

É extremamente importante, aquando da realização dos planos de voo, ter em consideração a sobreposição entre as fotografias aéreas e o tamanho de grão espacial ou distância de amostragem do solo (GSD) (Assmann, et al., 2018). Ambas estas características estão relacionadas com o espaçamento entre as fiadas, tempo de disparo entre cada fotografia, bem como altura do voo realizado (Parrot Sequoia, 2016).

No total, utilizaram-se duas a quatro baterias por área de estudo, assegurando-se desta forma, a realização de vários planos de voo e a boa sobreposição das fotografias aéreas (60% lateral e 80% longitudinal). No total, realizaram-se quatro voos planares sobre BGR e dois voos planares sobre KWAK (fig. 19). Capturaram-se um total de 3 921 fotografias áreas em BGR e 1 099 em KWAK.

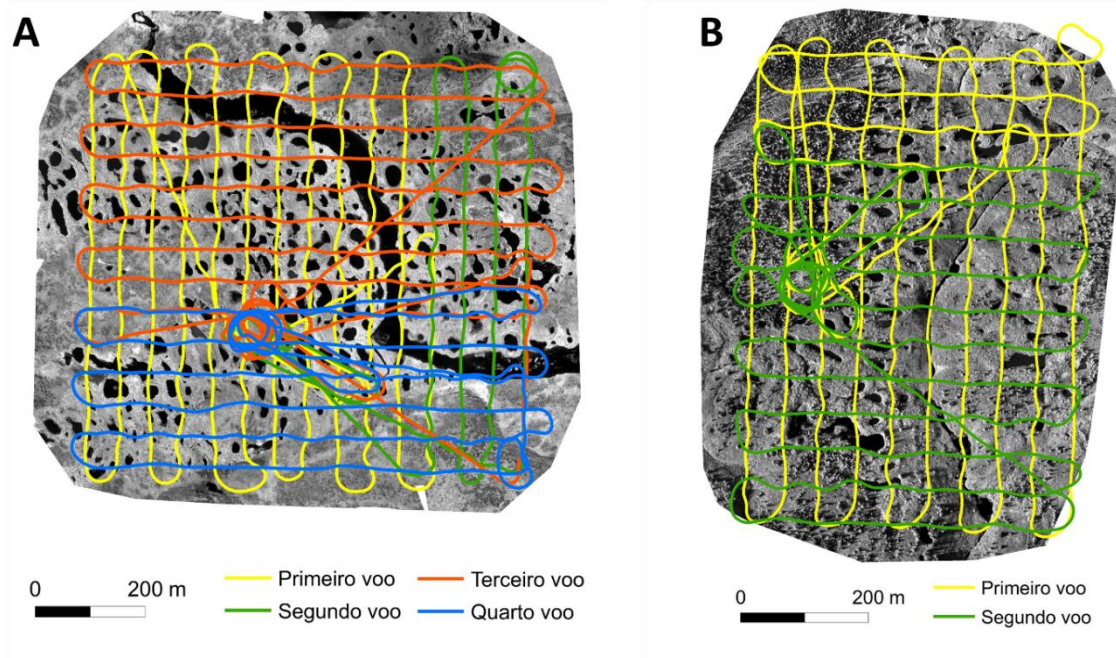


Figura 19: Percursos realizados pelo VANT durante os quatro voos em BGR (A) e os dois voos em KWAK (B)

Preparou-se e executou-se cada plano de voo recorrendo ao programa *eMotion 3*. O voo apresentou uma altitude de 110 metros em relação ao solo. A proximidade da câmara multiespectral à superfície terrestre dispensa a utilização de um modelo de correção atmosférica, ao contrário das imagens provenientes de sensores instalados em satélites (Assmann et al., 2018).

O VANT utilizado não era *RTK/PPK*, não possuindo, portanto, *GPS* de alta precisão e não garantindo exatidão fotogramétrica. Além deste facto, as características das áreas de estudo compostas por árvores e arbustos altos e muito densos, sobre solo completamente alagado, impossibilitou a distribuição de *Ground Control Points* (GCP) e respetiva georreferenciação dos mesmos recorrendo-se a um *GPS* diferencial (*D-GPS*). Tal facto introduziu um erro de vários centímetros/metros por pixel (máximo de 5 metros) em todos os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*, o que influenciou a qualidade de sobreposição com as imagens de satélite. A solução para este problema foi retificar e georreferenciar os ortomosaicos recorrendo-se a pontos de controlo, introduzidos tendo como referência as imagens de satélite, preferencialmente WV dada a sua melhor resolução espacial.

Ortorrectificaram-se as imagens WV 2 e 4 através do método RPC (*Rational Polynomial Coefficient*) do programa *Envi* 5.3 e tendo como base o Modelo de Digital de Terreno (MDT – *cdm\_34N* para BGR e *cdem\_33N* para KWAK) retirado do Portal de Dados Abertos do Governo do Canadá (Government of Canada, 2018). A resolução do MDT utilizado varia latitudinalmente, sendo que diminui com o aumento da latitude. Assim, o MDT que abrange o Vale de KWAK apresenta uma resolução melhor (20 metros), comparativamente ao MDT que abrange o Vale de BGR (50 metros), bem como melhor exatidão (Government of Canada, 2016).

Devido à dificuldade de utilização de vértices geodésicos regionais dados constrangimentos logísticos e devido à fraca resolução das imagens do *Google Earth/Maps*, tornou-se difícil a introdução de pontos de controlo aquando do processo de ortorrectificação das imagens WV. Em KWAK a ortorretificação das imagens WV 4 através do método RPC, sem introdução de pontos de controlo, relevou-se suficiente para garantir uma boa sobreposição com as imagens S2 e L8, pelo que se utilizaram as mesmas como referência para a retificação dos ortomosaicos provenientes da câmara multiespectral *Sequoia*. Verificaram-se deformações nos lagos desses ortomosaicos comparativamente às imagens WV 4, pelo que a sua retificação teve como base 5 pontos de controlo, uma transformação do tipo polinomial de 1ª ordem e resultou num erro médio quadrático de 0,567 metros. Em BGR o mesmo processo não se refletiu nos mesmos resultados de qualidade, provavelmente devido à pior resolução do MDT utilizado (Government of Canada, 2016; Government of Canada, 2018). Nesta área de estudo, mediante ortorretificação das imagens WV 2, através do método RPC, verificou-se um grande desvio relativo à sobreposição com os ortomosaicos da *Sequoia* e imagens L8 e S2, o que provocou a não coincidência da área das lagoas e demais elementos presentes na superfície terrestre. Neste caso, embora com um ligeiro desvio, verificou-se uma melhor sobreposição dos ortomosaicos da *Sequoia* com as imagens S2 e L8, comparativamente às imagens WV 2 ortorretificadas. Assim recorreu-se a um compósito de cor verdadeira (RGB) criado com imagens S2 por forma a retificar os ortomosaicos da *Sequoia* e imagens WV 2. A transformação necessária para a retificação das imagens WV 2 foi meramente linear. Por outro lado, para a retificação dos ortomosaicos da *Sequoia*, recorreu-se à aplicação de uma transformação de tipo polinomial de 1ª ordem. Introduziram-se 4 pontos de controlo no centro de determinadas lagoas e centro das células do compósito de cor verdadeira S2, facilmente detetáveis como lagoas, apresentando estes, preferencialmente, forma redonda e dimensão real próxima da resolução da célula do compósito de cor verdadeira S2 (100 m<sup>2</sup>).

Através de um processo exaustivo de inspeção visual, bem como tentativa e erro, assegurou-se qualidade na sobreposição das imagens das bandas provenientes de todos os sensores (Sequoia, L8, S2 e WV 2 e 4).

## A. PROCESSAMENTO COM *STRUCTURE FROM MOTION*

Processaram-se todas as fotografias aéreas capturadas durante os voos recorrendo-se ao programa *Pix4Dmapper*. Cada modelo, demorou em média dois dias a processar, num computador com CPU Intel(R) Core(TM) i7-6700K CPU @ 4.00GHz e 32 GB de RAM. O programa *Pix4Dmapper* baseia-se numa técnica fotogramétrica designada de *Structure from Motion*, permitindo não só a criação de ortomosaicos, como também a modelação da nuvem de pontos (cenário em 3D), a criação de Modelos Digitais de Superfície (MDS) e de Modelos Digitais de Terreno (MDT). As aplicabilidades da técnica *Structure from Motion* são vastas e transversais a uma multiplicidade de áreas científicas.

A configuração e processamento de cada modelo no *Pix4Dmapper* assenta em três fases: 1 - Processamento inicial; 2 - Nuvem de pontos e malha triangular; 3 - MDS, ortomosaicos e índices espectrais (Pix4D, 2017). Cada fase traduz-se em *outputs* valiosos numa ótica de análise, bem como numa ótica de extração de dados para novos modelos (fig. 20).

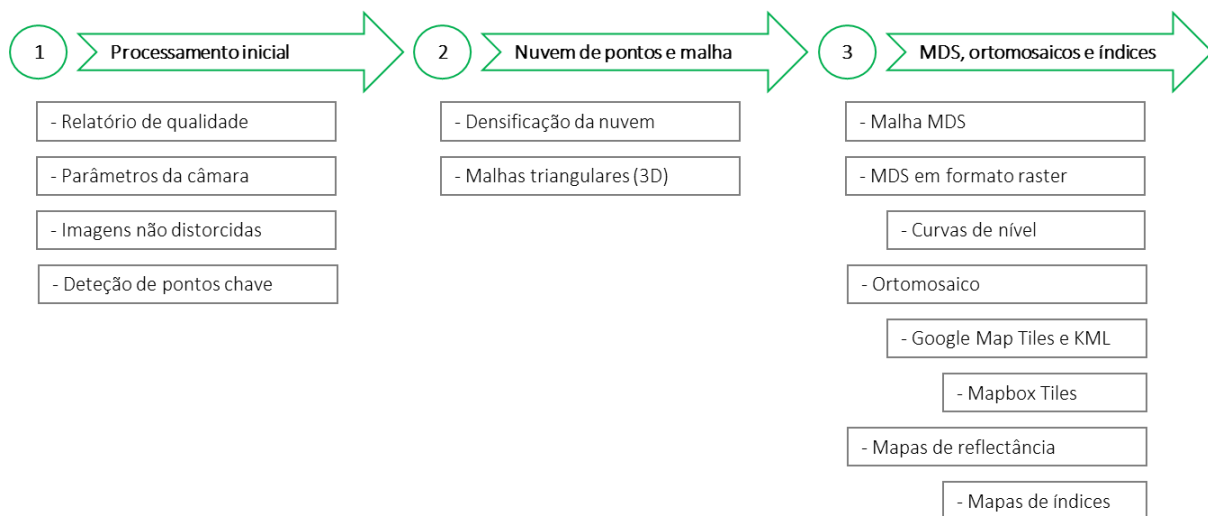


Figura 20: Fases de processamento dos modelos no *Pix4Dmapper* e *outputs* esperados (Adaptado de *Pix4D*, 2017)

A primeira fase compreende a georreferenciação das imagens, consideração dos parâmetros da câmara e ponderação dos pontos chave da nuvem de pontos. Os pontos chave consistem essencialmente em pontos comuns de vértices de objetos espaciais facilmente detetáveis nas áreas de sobreposição das fotografias. Cada ponto será comum a várias fotografias. Ao clicar-se num determinado ponto da teia torna-se possível avaliar a sua exatidão, erro e melhorar a qualidade da sua georreferenciação nas diversas fotografias, através da introdução de pontos de teia manuais sobre as mesmas. É possível a introdução de GCP por forma a melhorar a georreferenciação do modelo ou validá-la (CCP – *Check Control Points*). A primeira fase



é também acompanhada do *output* de um relatório de qualidade que deverá ser analisado por forma a verificar a qualidade do plano de voo, das fotografias utilizadas e dos diversos modelos gerados.

A segunda fase consiste essencialmente na densificação da nuvem de pontos e na criação de malhas triangulares que ligarão os diferentes pontos presentes na nuvem (fig. 21). Nesta fase, o programa tentará encontrar mais pontos comuns entre as fotografias, ao estabelecer mais pontos de teia no modelo, todos com coordenadas X, Y e Z. Procurará igualmente ajustar uma malha triangular a todos os pontos da teia, por forma a criar um modelo em 3D que busque minimizar a existência de buracos, através de um método de interpolação dos pixéis, garantindo qualidade na georreferenciação. O *Pix4Dmapper* dispõe de ferramentas de edição da nuvem de pontos, que permitem melhorar a exatidão fotogramétrica e a aparência visual do modelo, tais como ferramentas de eliminação de pontos, suavização de superfícies etc.

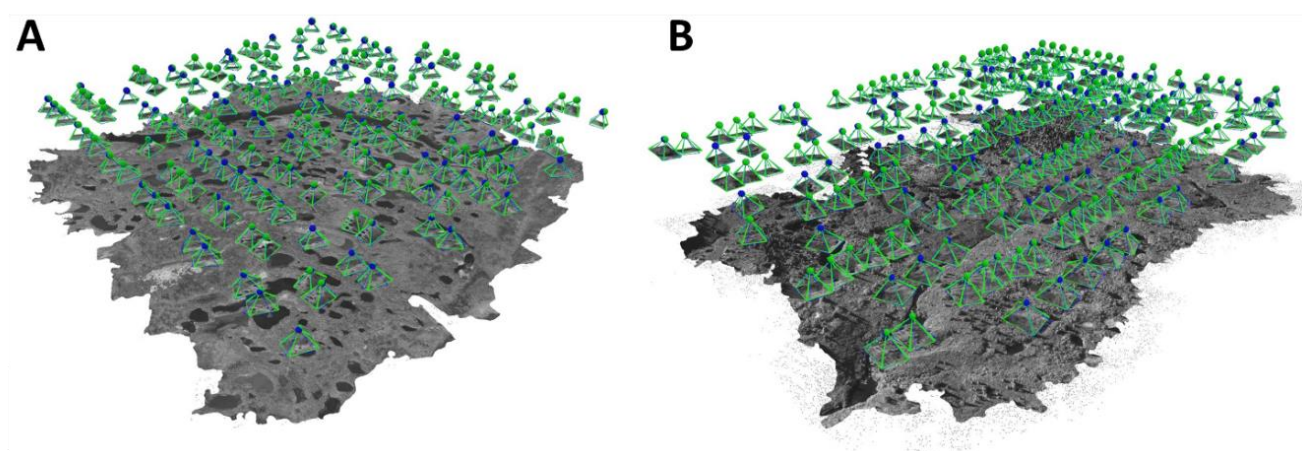


Figura 21: Resultados do processamento da primeira e segunda fase do modelo no *Pix4Dmapper* em BGR (A) e em KWAK (B)

Por fim, a terceira fase refere-se essencialmente à geração do MDS e MDT, bem como, ortomosaicos e mapas de reflectância. Dadas as características do sensor utilizado, o MDT consiste numa mera suavização do MDS. No *Pix4Dmapper* vários métodos de interpolação poderão ser selecionados para a geração do MDS. Os métodos de interpolação possíveis são o *Inverse Distance Weight* (IDW) e o *Triangulated Irregular Network* (TIN). Relativamente aos ortomosaicos, o *Pix4Dmapper* oferece a possibilidade de corrigir eventuais erros que sejam gerados, tais como distorções ou buracos, através da introdução de imagens ortorrectificadas ou planares sobre essas superfícies. A grande diferença entre as imagens ortorrectificadas e planares tem que ver com o facto de as planares serem uma mera melhoria visual do ortomosaico, não sendo possível, portanto, o cálculo de distâncias e áreas mediante a sua introdução em determinadas superfícies do modelo (Pix4D, 2017).

O *Pix4Dmapper* apresenta modelos de processamento pré-configurados para fotografias multiespectrais e modelos de processamento pré-configurados para fotografias de cor verdadeira. As fotografias multiespectrais têm de ser processadas num projeto multiespectral e as fotografias relativas a compósitos de cor verdadeira têm de ser processadas noutra projeto para esse efeito (projeto de cor verdadeira) (fig. 22). Os parâmetros dos modelos podem ser configurados pelo utilizador, sendo que podem ser modificados para cada uma das fases de processamento, por forma a melhorar os resultados obtidos. Os

ortomosaicos com os valores de reflectância por pixel só estão disponíveis para projetos multiespectrais, sendo que são o resultado da correção radiométrica, tendo em consideração as fotografias capturadas sobre o alvo de calibração antes do voo (Assmann et al., 2018).

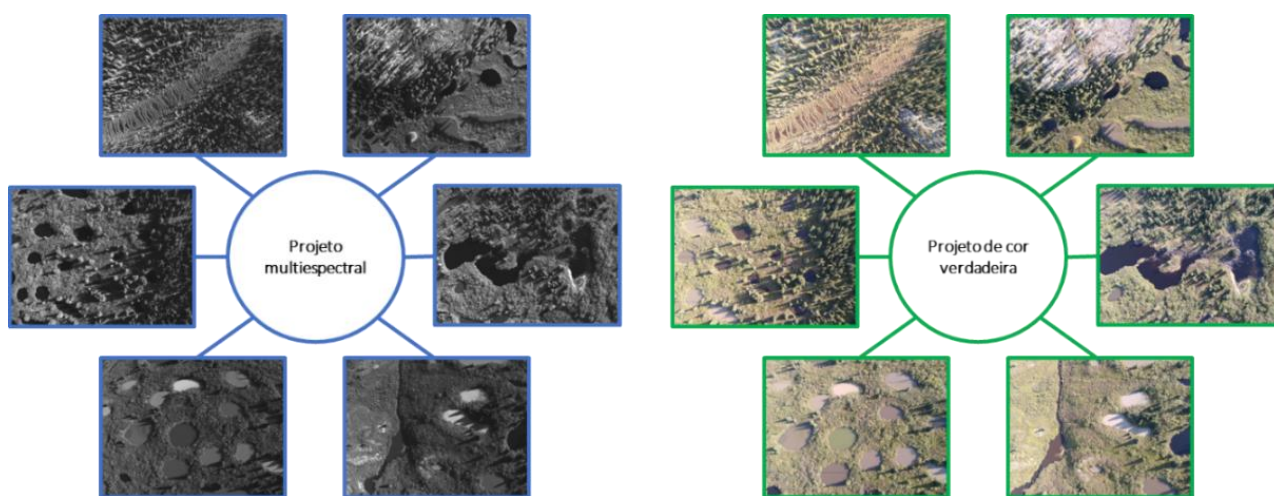


Figura 22: Exemplos de fotografias utilizadas no projeto multiespectral e no projeto de cor verdadeira

É possível juntar vários planos de voo no mesmo projeto. Os projetos de junção referem-se a uma junção entre dois ou mais projetos multiespectrais ou dois ou mais projetos de cor verdadeira. Os projetos devem partilhar as mesmas características, sendo que permitem o aumento da disponibilidade de fotografias por área ou o aumento da área do projeto, potencialmente melhorando a qualidade dos ortomosaicos e dos modelos em 3D. Tal processo, permite a deteção de mais pontos comuns entre diferentes fotografias para o estabelecimento de mais pontos na nuvem e teia. Para tal junção ser possível, bastará processar a primeira fase de processamento de cada modelo. É recomendável, no entanto, aquando da realização deste processo, marcarem-se primeiramente pontos de teia manuais comuns, em cada um dos projetos *Pix4Dmapper*, separadamente, e só depois proceder à realização da junção. Este processo não é obrigatório, no entanto, favorece a existência de coerência espacial na construção dos modelos derivados do projeto junto, sobretudo se as fotografias se referirem a diferentes tipos de voos (planares ou oblíquos).

Ao considerarem-se algumas experiências realizadas, verificou-se que a junção de projetos é mais aconselhável quando se procede à utilização de fotografias relativas a compósitos de cor verdadeira (projetos de cor verdadeira) ao invés de fotografias relativas a bandas multiespectrais (projetos multiespectrais), uma vez que um novo plano de voo para um projeto multiespectral antecede a necessidade de uma nova calibração radiométrica da câmara e respetivo sensor, recorrendo-se à captação de novas fotografias sobre o alvo de calibração. É aconselhável que a calibração ocorra antes e depois de cada voo (Assmann et al., 2018). No entanto, a utilização dos mesmos, ou de alvos de calibração relativos a diferentes planos de voo sobre um projeto multiespectral de junção, pode resultar em erros graves na reflectância dos pixéis, sobretudo se os voos forem realizados em escalas temporais muito espaçadas entre si (i.e., dias diferentes).

Apesar de todos os voos terem sido realizados em intervalos de tempo próximos, em todas as áreas de estudo, a junção de alguns projetos multiespectrais resultou em faixas mais e menos sombreadas sobre os ortomosaicos das diferentes bandas. Por esta razão, optou-se pela utilização do plano de voo mais completo, proveniente de um único projeto multiespectral para a derivação de resultados. Desta forma garantiu-se exatidão, tanto quanto possível, dos valores de reflectância de cada pixel em cada banda.

Outro aspeto importante a ter em consideração tem que ver com a influência das nuvens, uma vez que os planos de voo devem ser realizados mediante condições de iluminação homogéneas, preferencialmente ao meio dia solar (Assmann et al., 2018). A não consideração deste pressuposto refletir-se-á igualmente na introdução de faixas mais e menos sombreadas nos ortomosaicos gerados, sejam ou não relativos a um único voo, e consequente manipulação dos pixéis de reflectância que se encontrem nessas faixas (fig. 23).

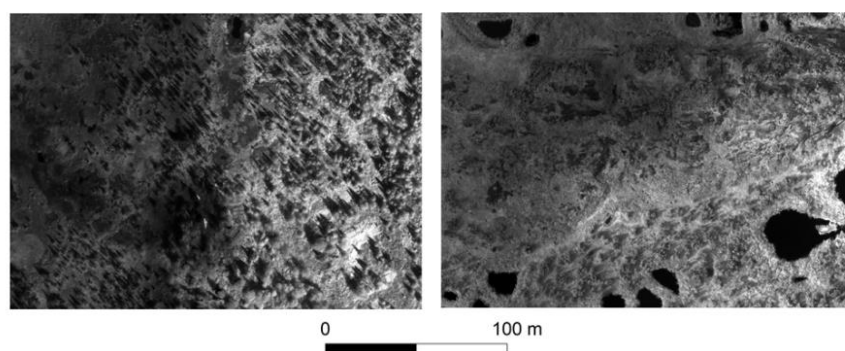


Figura 23: Erros de reflectância relacionados com a introdução de faixas sombreadas nos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* provocados pela influência de sombras de nuvens (bandas do vermelho)

Superfícies muito homogéneas são demasiado complicadas para que o programa *Pix4Dmapper* consiga modelar de forma eficiente. Em áreas com esta característica, tornar-se-á extremamente difícil a deteção de pontos comuns únicos (facilmente caracteristicamente identificáveis) entre várias fotografias. Superfícies de água, de grandes dimensões, tais como grandes áreas de mares, oceanos e lagos, são de impossível mapeamento através de *Structure from Motion* (Pix4D, 2017). A este nível verificaram-se alguns erros relativos à construção dos ortomosaicos na área das lagoas, sobretudo em BGR (fig. 24). A sua dimensão reduzida, possibilitou, no entanto, na maior parte dos casos uma construção bem conseguida.

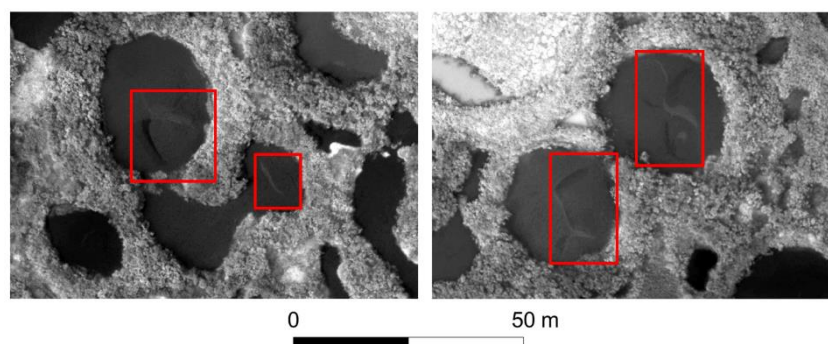


Figura 24: Exemplos de alguns erros (caixas vermelhas) nas áreas das lagoas gerados durante a construção dos ortomosaicos da *Sequoia* no *Pix4Dmapper* (bandas do vermelho)

Geralmente, quanto melhor a sobreposição das fotografias, melhor a qualidade dos ortomosaicos e modelos em 3D (Pix4D, 2017). Regra geral, as margens dos modelos contêm mais erros (distorções), dada a menor quantidade e capacidade de sobreposição de fotografias como resultado das áreas de término do plano de voo e manobras de inversão de direção que são realizadas pelo VANT. As margens dos ortomosaicos para cada banda devem ser redefinidas considerando-se a qualidade de sobreposição das fotografias (fig. 25).

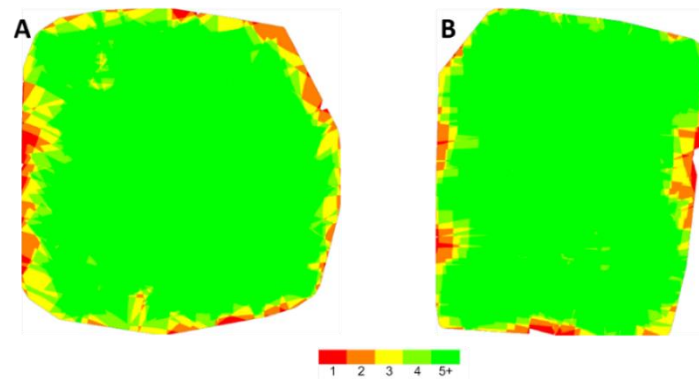


Figura 25: Sobreposição de fotografias no projeto multiespectral mais completo de BGR (A) e de KWAK (B)  
Nota: A escala de cor de 1 a 5 corresponde ao número de imagens sobrepostas num determinado local

Como resultado do processamento das fotografias aéreas provenientes do plano de voo mais completo realizado pelo VANT, obtiveram-se cinco ortomosaicos, sendo quatro relativos às bandas multiespectrais e um relativo a um compósito de cor verdadeira, para a ambas as áreas de verdade de terreno nomeadamente para BGR (fig. 26) e para KWAK (fig. 27).

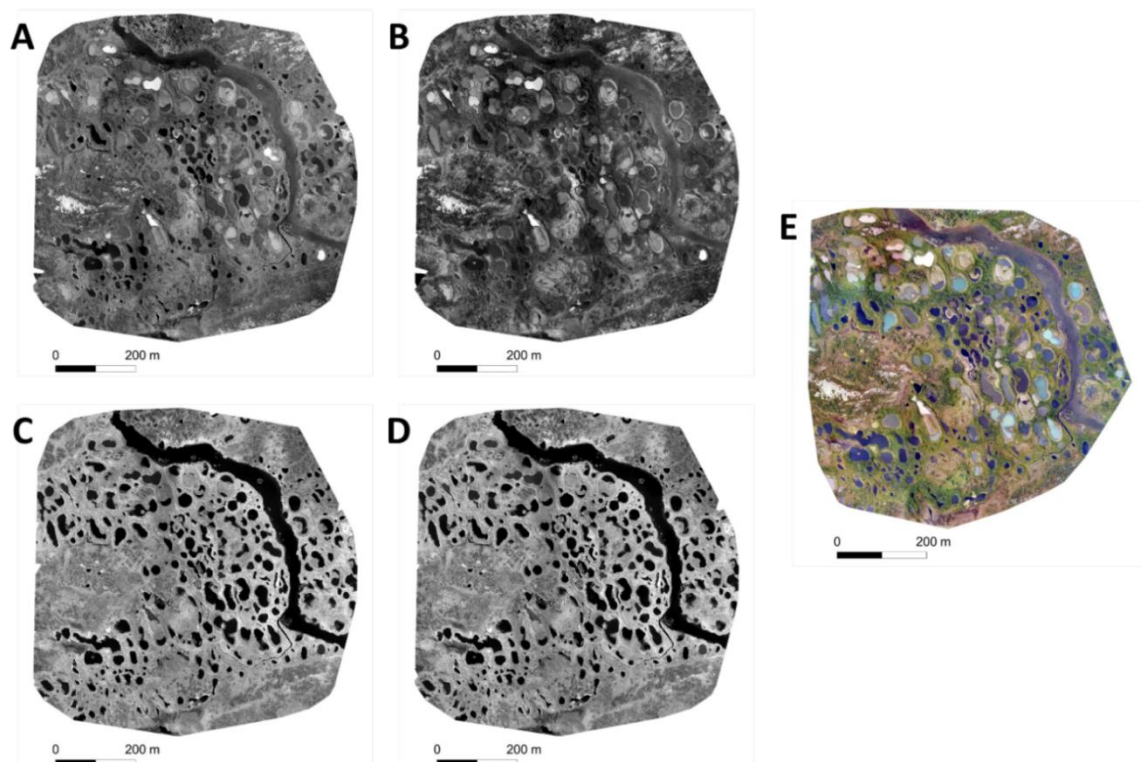


Figura 26: Ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para a área de verdade de terreno de BGR  
(A – verde, B – vermelho, C – limite do vermelho, D – infravermelho próximo e E – compósito de cor verdadeira)



Devido à logística disponível para a realização do trabalho de campo, o plano de voo em BGR não pôde ser realizado em condições de iluminação homogêneas. Por esta razão, verificaram-se vários erros de reflectância associados aos pixels localizados em faixas sombreadas nos ortomosaicos multiespectrais. Estas faixas sombreadas originaram-se devido à passagem de nuvens, mais ou menos densas, sobre a área de estudo, aquando da realização do voo.

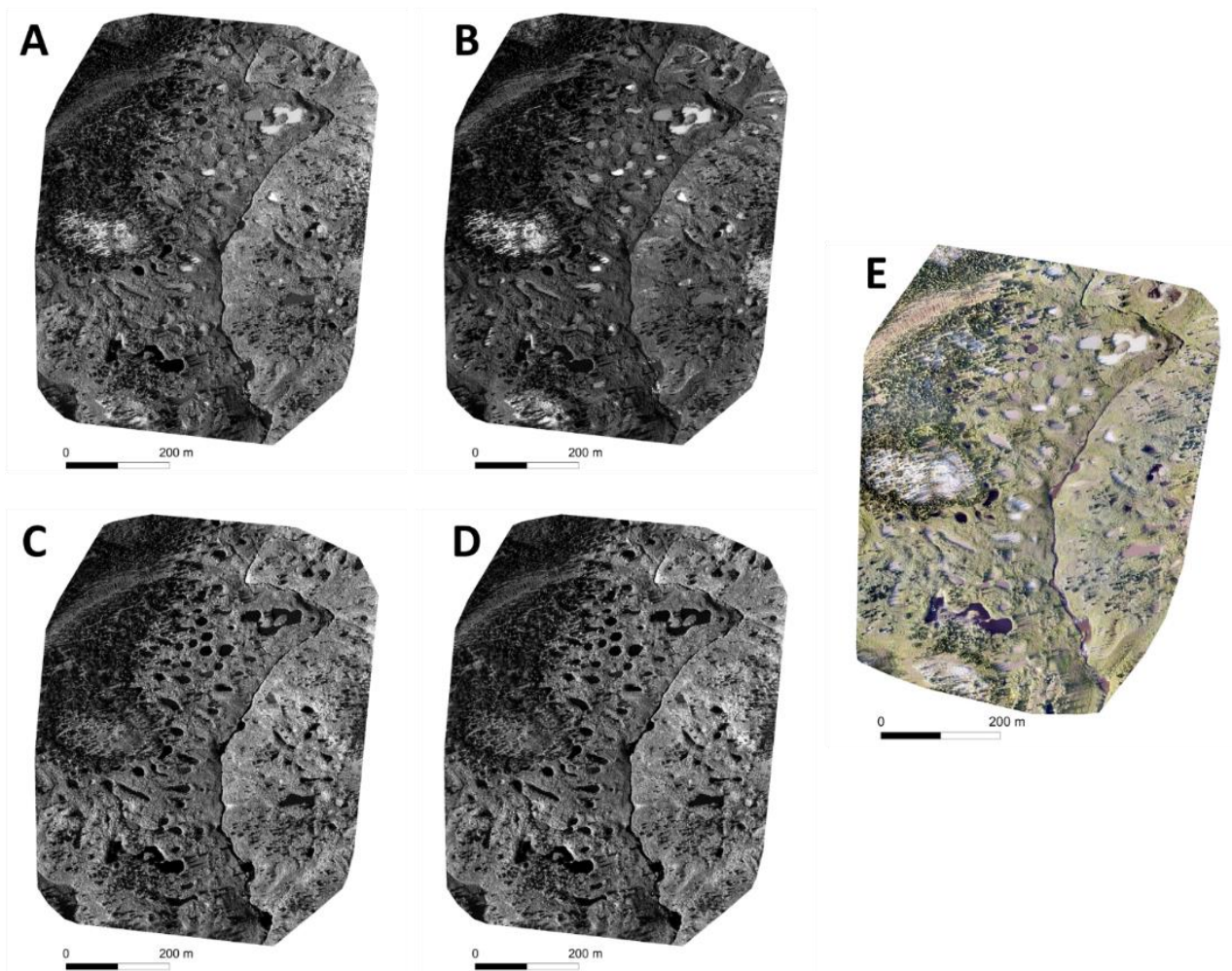


Figura 27: Ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para a área de verdade de terreno de KWAK (A – verde, B – vermelho, C – limite do vermelho, D – infravermelho próximo e E – compósito de cor verdadeira)

#### 4.2.2. DELIMITAÇÃO DAS LAGOAS TERMOCÁRSICAS

Para as áreas de verdade de terreno de ambas as áreas de estudo, a metodologia adotada para a delimitação das lagoas termocársicas partiu da utilização dos ortomosaicos de muito alta resolução relativos às bandas multiespectrais da câmara *Sequoia*. Através desta metodologia procurou-se uma abordagem orientada ao objeto, nomeadamente direccionada para a extração e delimitação das lagoas termocársicas nas duas áreas de estudo (BGR e KWAK). Procurou-se uma alternativa faseada, por forma a fazer face a diferentes obstáculos, aquando da sua delimitação em imagens de muito alta resolução.

Existe uma enorme variedade de técnicas utilizadas para a extração de objetos partindo de imagens multiespectrais e hiperespectrais. Estas técnicas podem ser baseadas no pixel, como por exemplo através do estabelecimento de limiares de índices espectrais (*thresholding*), orientadas ao objeto (*region-based* – agregar pixels de regiões homogêneas e *edge-based* – estabelecer fronteiras entre objetos) ou híbridas. Uma abordagem híbrida inclui uma fusão de uma ou mais técnicas (Dey, 2011). A abordagem híbrida é o conjunto de técnicas que melhor descreve a solução adotada no decorrer desta dissertação.

Há uma relação forte e inversamente proporcional entre o aumento da resolução das imagens e o tamanho dos objetos extraídos. O mundo real apresenta uma enorme diversidade e heterogeneidade de objetos presentes na superfície terrestre. Tal facto exige a necessidade de adequação de um conjunto de imagens de acordo com os objetivos de determinado trabalho e torna, por vezes, o seu processo de tratamento uma tarefa complicada e morosa.

Os lagos e lagoas termocársicas são muito variáveis, por apresentarem diferentes características limnológicas, biogeoquímicas e geomorfológicas. Essas características são espelhadas através das suas diferentes propriedades espectrais e morfológicas. As suas diferentes características referem-se a heterogeneidades espectrais, sendo estas, tanto maiores, quanto maior a resolução das imagens utilizadas. Torna-se difícil a realização e utilização de uma abordagem metodológica global e única, devido a fatores tais como a turbidez da água, partículas suspensas, conteúdo de clorofila e mineral e a presença de vegetação aquática, todos estes fatores com grande variabilidade espacial e temporal (Tian et al., 2017). Neste trabalho, o processo de delimitação das lagoas termocársicas verificou-se particularmente difícil, devido a misturas espectrais introduzidas pelas sombras, principalmente em KWAK, mas também devido à diversidade das características das lagoas de ambas as áreas de estudo (fig. 28).

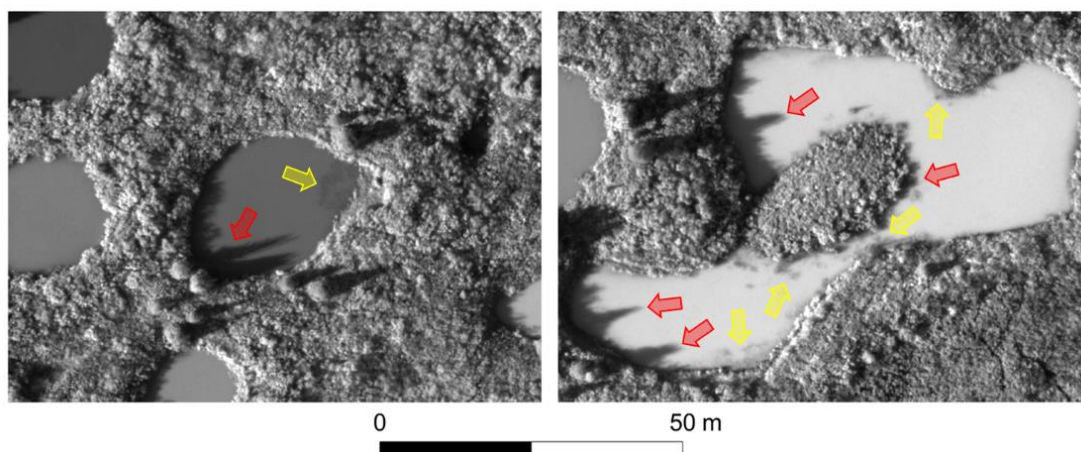


Figura 28: Exemplos da influência das sombras (setas a vermelho) e da vegetação aquática (setas a amarelo) nas lagoas termocársicas de KWAK (bandas do vermelho)

O processo de delimitação das lagoas, assentou em três fases: (1) segmentação através do algoritmo multiresolução; (2) definição de limiares (*thresholds*) através de índices espectrais (NDVI e NDWI); (3) classificação não supervisionada por *clustering K-Means* (fig. 29). Estas fases relevaram-se importantes

considerando diferentes objetivos no processo de classificação e extração das lagoas, sendo a primeira e a segunda indispensáveis, e a terceira complementar. Na primeira fase, procurou-se segmentar as fronteiras entre as lagoas (soma das áreas com sombra e áreas sem sombra) e a vegetação, através de uma abordagem *straightforward* ao utilizar-se o primeiro passo (segmentação) das Classificações Orientadas ao Objeto (OBIA). Na segunda fase pretendeu-se classificar as lagoas, estabelecendo-se limiares de variáveis sobre os segmentos, através de índices espectrais (NDWI versus NDVI). Na terceira e última fase, procurou-se melhorar a delimitação das áreas com sombra e áreas sem sombra na área das lagoas. A terceira fase revelou-se dispensável para BGR, uma vez que não se verificou a existência de sombras projetadas por elementos presentes na superfície terrestre, facilitando de forma significativa o seu processo de extração.

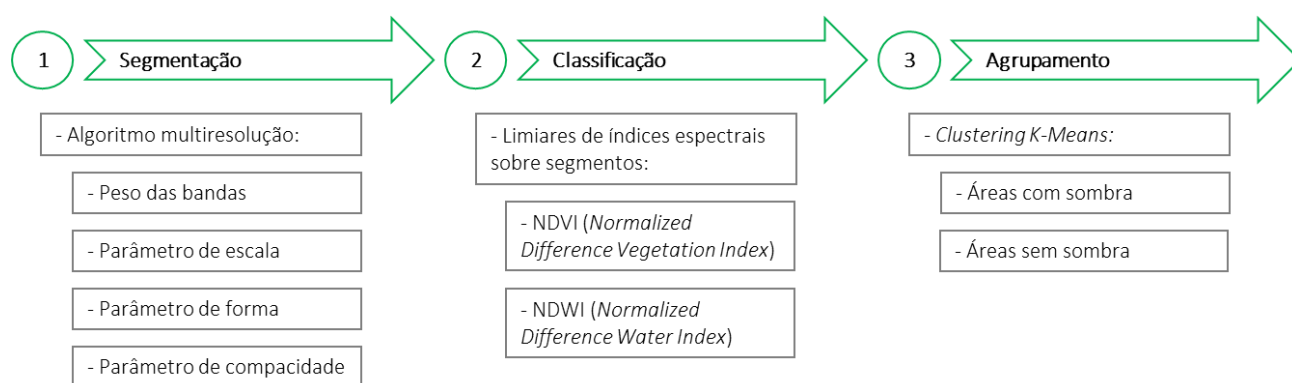


Figura 29: Fases, métodos, índices e técnicas utilizadas para a delimitação das lagoas nas áreas de verdade de terreno (BGR e KWAK)

## A. FASE 1 – SEGMENTAÇÃO

A segmentação é o primeiro e o mais importante passo da OBIA (Dey, 2011; Kavzoglu & Yildiz, 2014). Este método é extremamente aconselhável para imagens de alta e muito alta resolução, comparativamente a outros métodos de classificação direcionados ao valor espectral do pixel, ao permitir a diminuição do ruído (efeito *salt-and-pepper*) e o aumento da exatidão das classificações (Huiping et al., 2003; Kavzoglu & Yildiz, 2014). Neste trabalho utilizou-se apenas o primeiro passo da OBIA (segmentação), sobretudo devido aos resultados obtidos e à dificuldade de estimação dos seus parâmetros.

A segmentação tem como objetivo, delimitar objetos do mundo real representados em imagens, ao procurar a sua homogeneidade espectral (*region-based*) e estabelecer as suas fronteiras (*edge-based*) (Huiping et al., 2003; Dey, 2011). A ponderação correta da segmentação revela-se extremamente importante para que as variáveis dos segmentos, relativas às suas formas, propriedades espectrais, texturas, relações espaciais, entre outras, se confirmem representativas em futuros processos de classificação. Assim, os parâmetros utilizados na segmentação, são condicionantes dos resultados inerentes ao processo de classificação (Kavzoglu & Yildiz, 2014). Efetuou-se este passo recorrendo-se ao programa *eCognition Developer 9.0*.

A utilização do programa *eCognition* permitiu o uso de um conjunto de métricas e índices de forma das lagoas para as áreas de verdade de terreno, como também para as áreas de teste regional. Selecionaram-

se métricas relativas à assimetria, índice de forma, ajuste retangular, ajuste elíptico, densidade e direção principal (Trimble, 2014). Conseguiu-se assim realizar uma caracterização detalhada da morfometria das lagoas e avaliar a representatividade das selecionadas como amostra nas áreas de verdade de terreno, em comparação com as áreas de teste regional.

## I. ÍNDICE DE ASSIMETRIA PARA OBJETOS 2D

O índice de assimetria para objetos 2D, pode variar entre 0 e 1, sendo que o valor aumenta com a assimetria do objeto. Este índice descreve o comprimento relativo de um determinado objeto, comparando-o com um polígono regular. Assim, aproxima uma elipse ao objeto, estabelecendo relação entre os comprimentos do eixo menor e eixo maior. Tem em consideração os seguintes parâmetros para o seu cálculo: Var X – variância do X; Var Y – variância do Y (Trimble, 2014).

$$\frac{2\sqrt{\frac{1}{4}(\text{Var}X + \text{Var}Y)^2 + (\text{Var}XY)^2 - \text{Var}X \cdot \text{Var}Y}}{\text{Var}X + \text{Var}Y}$$

## II. ÍNDICE DE FORMA DE OBJETOS 2D

O índice de forma de objetos 2D, é utilizado para caracterizar a suavidade das fronteiras dos objetos, sendo que quanto mais suave for a fronteira desse objeto, mais baixo será o valor deste índice. No *eCognition*, este índice é calculado tendo em consideração o comprimento da fronteira do objeto dividido por quatro vezes a raiz quadrada da sua área. Tem em consideração os seguintes parâmetros para o seu cálculo:  $b_v$  – comprimento da fronteira do objeto;  $4\sqrt{\#P_v}$  sendo a fronteira do quadrado com área  $\#P_v$  (Trimble, 2014).

$$\frac{b_v}{4\sqrt{\#P_v}}$$

## III. AJUSTE RECTANGULAR

O ajuste retangular descreve quão bem um determinado objeto 2D se ajusta a um retângulo 2D de dimensões semelhantes. O valor 0 descreve um objeto que não se ajusta a um retângulo e o valor 1 descreve um objeto que se ajusta completamente a um retângulo. O cálculo é baseado num retângulo com a mesma área do objeto. Tendo em consideração que a dimensão do retângulo é igual à razão de comprimento e largura do objeto, o objetivo desta métrica será comparar a área do objeto fora do retângulo com a área do objeto dentro do retângulo. Tem em consideração os seguintes parâmetros para o seu cálculo  $p_v(x,y)$  sendo a distância elíptica num pixel (x,y) (Trimble 2014).



$$\frac{\{\#(x, y) \in P_v : \rho_v(x, y) \leq 1\}}{\#P_v}$$

#### IV. AJUSTE ELÍPTICO

O ajuste elíptico indica quão bem um determinado objeto se ajusta a um elipsoide 2D de tamanho e proporções semelhantes. O valor 0 descreve um objeto que não se ajusta a um elipsoide e o valor 1 descreve um objeto que se ajusta na perfeição a um elipsoide. O cálculo é baseado numa elipse com a mesma área do objeto. Tendo em consideração que a dimensão da elipse é igual à razão de comprimento e largura do objeto, o objetivo desta métrica será comparar a área do objeto fora da elipse com a área do objeto dentro da elipse (Trimble, 2014). Tem em consideração os seguintes parâmetros para o seu cálculo:  $E_v(x, y)$  sendo a distância elíptica num pixel  $(x, y)$ ;  $P_v$  sendo o conjunto de pixéis no objeto;  $\#P_v$  sendo o número total de pixéis contidos no  $P_v$ .

$$\varphi = 2 \cdot \frac{\#\{(x, y) \in P_v : \varepsilon_v(x, y) \leq 1\}}{\#P_v} - 1$$

#### V. DENSIDADE

A métrica relativa à densidade descreve a distribuição espacial dos pixéis no interior do objeto. No *eCognition* o objeto mais denso é um cubo, obtendo esse tipo de objetos valores mais altos, sendo o objeto menos denso um segmento (filamento), obtendo esse tipo de objetos valores mais baixos. A densidade é calculada com o número de pixéis que formam o objeto dividido pelo seu raio aproximado, tendo como base uma matriz de covariância. Tem em consideração os seguintes parâmetros para o seu cálculo:  $\sqrt{\#P_v}$  sendo o diâmetro de objeto quadrado com  $\#P_v$  pixéis;  $\sqrt{\text{Var}X + \text{Var}Y}$  sendo o diâmetro da elipse (Trimble, 2014).

$$\frac{\sqrt{\#P_v}}{1 + \sqrt{\text{Var}X + \text{Var}Y}}$$

#### VI. DIREÇÃO PRINCIPAL

Por fim, a métrica relativa à direção principal de um objeto é definida como a direção do autovetor (*eigenvector*) pertencente ao maior dos dois autovalores (*eigenvalues*), derivados da matriz de covariância da distribuição espacial do objeto.

Tem em consideração os seguintes parâmetros para o seu cálculo:  $\text{Var} X$  – variância do  $X$ ;  $\text{Var} Y$  – variância do  $Y$ ;  $\lambda_1$  sendo o autovetor (Trimble, 2014).

$$\frac{180^\circ}{\pi} \tan^{-1}(\text{Var}XY, \lambda_1 - \text{Var}Y) + 90^\circ$$

O *eCognition Developer 9.0* destaca-se pela oferta do algoritmo multiresolução, um dos algoritmos mais utilizados e aconselhados para imagens de muito alta resolução (Dey, 2011). Este algoritmo oferece uma abordagem *bottom-up* (do pixel à região) e parte de uma técnica de segmentação de tipo multiescalar (Dey, 2011; Kavzoglu & Yildiz, 2014). A sua implementação baseia-se na estimação de três parâmetros: escala, forma e compacidade. O parâmetro relativo à escala refere-se essencialmente à dimensão dos segmentos; o parâmetro relativo à forma fornece um balanço entre a forma e a cor dos objetos; e o parâmetro relativo à compacidade fornece um balanço entre a compacidade e a suavidade dos objetos (Kavzoglu & Yildiz, 2014). Parâmetros suplementares referem-se aos pesos que as diferentes bandas podem apresentar, como reflexo do seu grau de importância para a segmentação, ao considerarem-se os objetivos do trabalho. No decorrer deste processo utilizaram-se as quatro bandas multiespectrais da *Sequoia* num compósito de falsa cor, sendo que a banda do infravermelho próximo obteve o dobro da importância face às restantes bandas, o que ajudou a estabelecer as fronteiras entre as lagoas e a vegetação de forma mais eficaz. A vegetação reflete de forma significativa na banda deste comprimento de onda, potenciando-se assim a função *edge-based* (estabelecer fronteiras entre objetos), do algoritmo multiresolução. Uma segmentação através do algoritmo multiresolução bem-sucedida, requer a estimação ótima dos três parâmetros, contudo, a sua estimação constitui um dos principais problemas deste algoritmo (Dey, 2011). Para além deste facto, ao considerarem-se imagens de muito alta resolução (13 cm), verifica-se que os parâmetros têm de apresentar valores muito baixos, para que os segmentos modelem as formas reais dos objetos que se pretende isolar e classificar (excessivo número de casas decimais). Como tal, nesta ordem de valores as combinações entre os parâmetros são quase intermináveis o que dificulta ainda mais a sua estimação e ponderação conjunta.

Numa tentativa inicial, procurou-se uma abordagem *straightforward*, seguindo-se uma ordem na ponderação dos parâmetros, por forma a segmentar o compósito multiespectral, individualizar as lagoas e respetivas áreas com e sem sombra (em KWAK). Assim, optou-se por criar três cenários de segmentação (extrema segmentação, média segmentação e fraca segmentação) tendo em consideração valores diferenciados do parâmetro de escala. Uma vez criados estes cenários, o objetivo consistiu em variar individualmente cada parâmetro (forma e compacidade) em cada cenário, por forma a perceber a sua importância e influência no processo de segmentação (fig. 30). Os resultados revelaram-se tendencialmente melhores num cenário de extrema segmentação comparativamente aos restantes cenários, independentemente dos valores dos restantes parâmetros, devido à dimensão reduzida dos objetos que se pretendia isolar. Nenhum dos dois parâmetros, relativos à forma e à compacidade, demonstrou ser benéfico para a segmentação com o seu aumento, apenas com a sua diminuição. A variação dos parâmetros ocorreu com o sucessivo aumento de casas decimais (introdução de valores 0) e variação do último dígito de 1 a 9. Em

experiências realizadas, com a variação dos restantes dígitos, verificaram-se resultados sem lógica e variações aleatórias introduzidas nos segmentos.

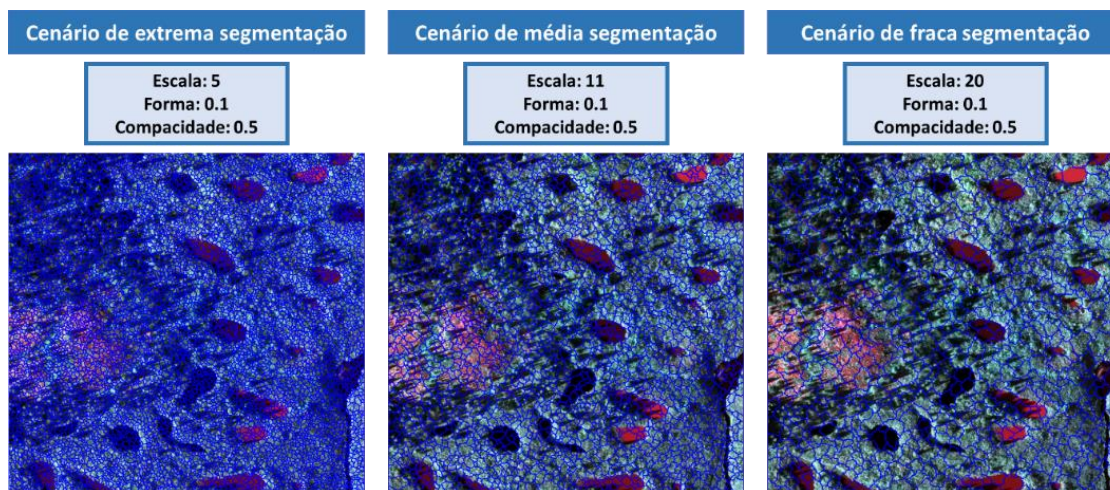


Figura 30: Cenários de segmentação derivados a partir do parâmetro de escala utilizados na abordagem *straightforward* (KWAK)

Em imagens de muito alta resolução, o mínimo valor possível para cada um dos parâmetros é quase infinito, no entanto, a partir de determinado valor o padrão dos segmentos mantém-se e a variação na forma dos mesmos é mínima, atingindo-se assim o ponto de estabilização da segmentação. A solução será parar e perceber quais as melhores tentativas até então. O cenário de extrema segmentação ofereceu margem de manobra aos restantes parâmetros (forma e compacidade) para o ajuste dos segmentos aos objetos que se pretendia isolar e classificar. O parâmetro relativo à forma ofereceu melhores resultados, aquando da sua diminuição, comparativamente ao parâmetro relativo à compacidade (Kavzoglu & Yildiz, 2014). O melhor resultado foi selecionado por inspeção visual, considerando-se o tal ponto de estabilização da segmentação em cada parâmetro. A melhor tentativa de segmentação geral foi registada com um parâmetro de forma de 0.00000001 e com um parâmetro de compacidade fixo no valor inicial de 0.5 (fig. 31).

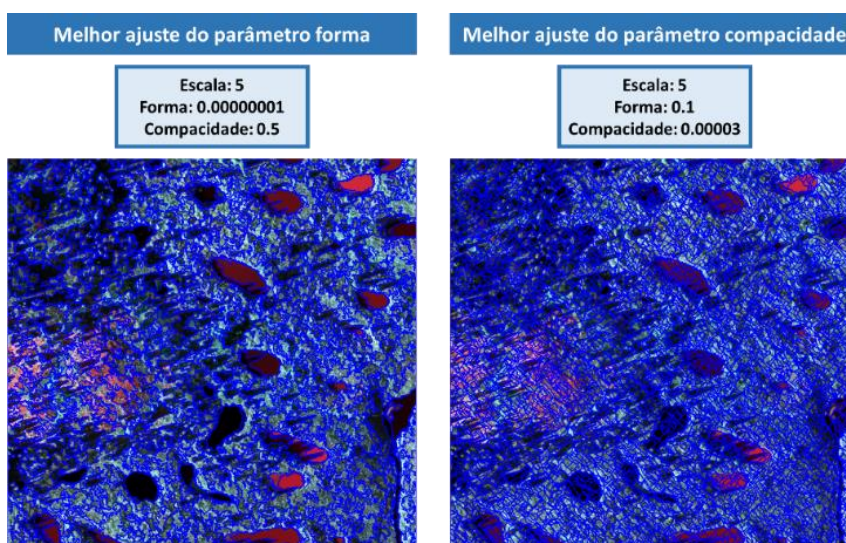


Figura 31: Melhor ajuste do parâmetro forma *versus* melhor ajuste do parâmetro compacidade (melhor tentativa geral), num cenário de extrema segmentação (parâmetro de escala fixo no valor 5) na abordagem *straightforward* (KWAK)

Apesar das várias tentativas, depois de ponderada a melhor, os resultados não se revelaram satisfatórios, em ambas as áreas de estudo, com especial destaque para KWAK, devido a misturas espectrais introduzidas pelas sombras. Ao procurar-se o melhor ajuste levando-se cada parâmetro ao ponto de estabilização num cenário de extrema segmentação, verificaram-se como principais problemas dos segmentos, o isolamento das lagoas face às áreas com e sem sombra (no caso de KWAK), bem como erros de delimitação em áreas de fronteira entre lagoas e vegetação (variação *fuzzy* devido a vegetação limítrofe submersa em pouca profundidade). Verificou-se, em alguns casos, o englobamento de pixéis nos mesmos segmentos relativos a áreas de sombra projetadas da vegetação para a lagoa. Através de uma abordagem *straightforward* que procurou tirar o máximo partido dos parâmetros de configuração do algoritmo multiresolução, sem auxílio de outros programas de otimização dos parâmetros, como por exemplo a ferramenta ESP do *eCognition Developer* (Drăguț et al., 2010), que sem razão aparente já não se encontra disponível no programa, introduziram-se vários erros na segmentação, com especial destaque para delimitações irrealistas das lagoas, adotando-se assim, outras soluções (fig. 32).

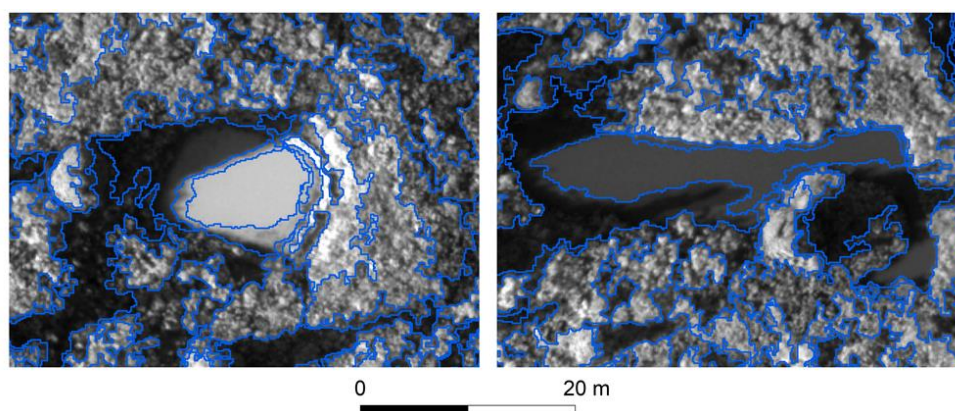


Figura 32: Exemplos de erros mais frequentes derivados da segmentação multiresolução através da abordagem *straightforward* em KWAK (banda do vermelho)

Ao adotar-se a segmentação do tipo *straightforward* através do algoritmo multiresolução, a solução passaria por cortar manualmente alguns polígonos mal segmentados. Por esta razão, procuraram-se outras alternativas através da introdução da fase dois e três no processo de delimitação das lagoas, ao invés de se optar pela classificação completa do compósito multispectral diretamente no *eCognition Developer*. Assim procurou-se um ajuste máximo dos segmentos, por forma a se abranger a maior área da lagoa possível, em ambas as áreas de estudo, assegurando-se a sua correta delimitação em função das fronteiras estabelecidas pela vegetação não submersa e não considerando a influência das sombras (no caso de KWAK).

## B. FASE 2 – CLASSIFICAÇÃO

Por forma a suprimir o obstáculo relativo à ponderação dos parâmetros do algoritmo multiresolução, procedeu-se à consideração de limiares sobre índices espectrais, num cenário de segmentação otimizada

(tanto quanto possível). A classificação dos segmentos ocorreu através do confronto entre dois índices, sendo eles o NDWI e o NDVI. Testaram-se estes dois índices considerando as características das áreas de estudo, numa ótica de extração das lagoas de forma positiva, pela seleção de todos os segmentos relativos a corpos de água (NDWI), ou negativa, pela criação de um novo ficheiro vetorial por exclusão de todos os segmentos relativos a vegetação (NDVI).

$$NDWI = \frac{(Verde - \text{Infravermelho próximo})}{(Verde + \text{Infravermelho próximo})} \quad NDVI = \frac{(\text{Infravermelho próximo} - Vermelho)}{(\text{Infravermelho próximo} + Vermelho)}$$

A classificação das lagoas foi realizada estabelecendo-se o limiar de NDWI, que apresentou o melhor balanço entre a sua classificação e a eliminação de ruído e erros de comissão/omissão provocados, sobretudo, pelas sombras, presentes nas áreas de estudo. O NDVI verificou-se como sendo menos eficiente para a delimitação das lagoas, comparativamente ao NDWI. O NDVI introduziu um maior ruído sobre a classificação, não separou de forma tão clara a vegetação das lagoas e evidenciou-se como sendo mais vulnerável a oscilações de reflectância provocadas pelas sombras projetadas nas mesmas (fig. 33).

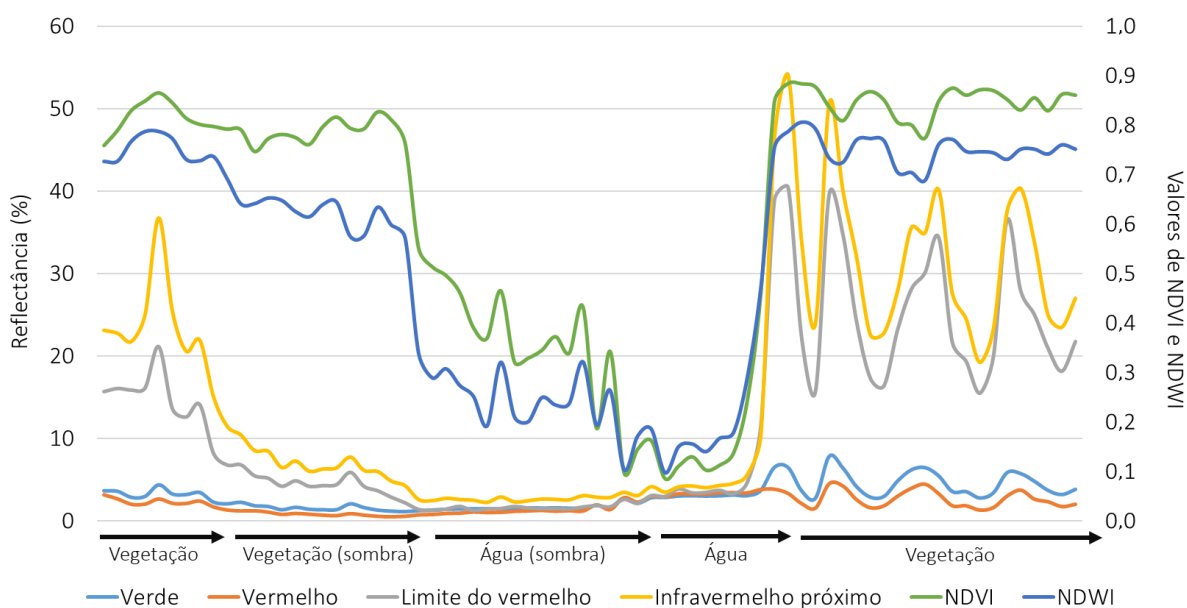


Figura 33: Perfis de reflectância das bandas da câmara *Parrot Sequoia* e dos índices de NDVI e NDWI em superfícies

A definição do limiar de NDWI permitiu a identificação de segmentos do compósito multiespectral relativos a água. Este índice revelou-se de tal forma eficaz, que permitiu a identificação de sombras sobre as lagoas, como sendo efetivamente água e a extração da sua maioria de forma completa.

Procedeu-se ao estabelecimento do limiar de NDWI de todos os segmentos com valor inferior a 0,54 em KWAK e inferior a 0,43 em BGR. Uma vez identificados esses segmentos, com probabilidade de serem água, procedeu-se à fusão automática dos contíguos, classificando-os como corpos de água, diretamente no *eCognition Developer 9.0* (fig. 34).



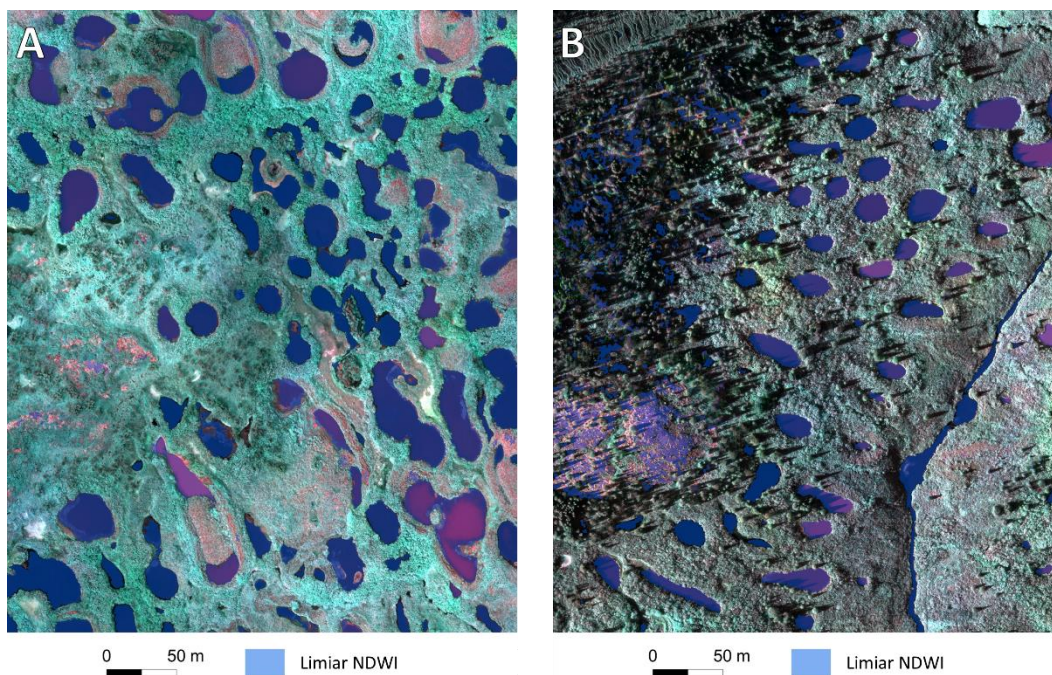


Figura 34: Exemplo da seleção de corpos de água prováveis através do limiar de NDWI em BGR (A) e KWAK (B)

Ao analisarem-se os resultados através de fotointerpretação e consequente manipulação das bandas RGB, respetivo contraste, cor e brilho, verificaram-se alguns erros de comissão (seleção de segmentos não relativos a água) e de omissão (não seleção de segmentos relativos a água) (tabela 3).

Tabela 3: Erros de comissão e omissão após o estabelecimento do limiar de NDWI

|                              | BGR                    |       | KWAK                   |      |
|------------------------------|------------------------|-------|------------------------|------|
|                              | Área (m <sup>2</sup> ) | %     | Área (m <sup>2</sup> ) | %    |
| Seleção com o limiar de NDWI | 80462                  | 100   | 31883                  | 100  |
| Lagoas                       | 80992                  | 100,7 | 23188                  | 72,7 |
| Erros de comissão            | 5757                   | 7,2   | 11041                  | 34,6 |
| Erros de omissão             | 6288                   | 7,8   | 2347                   | 7,4  |

Através de inspeção visual eliminaram-se os segmentos relativos a erros de comissão e juntaram-se às lagoas os segmentos relativos a erros de omissão. A área de estudo de BGR revelou erros de omissão superiores aos erros de comissão, uma vez que se estabeleceu um limiar de NDWI baixo (segmentos com valor inferior a 0.43). Ou seja, no tratamento desta área de estudo a classificação e junção de segmentos relativos a lagoas revelou-se mais importante do que a eliminação de erros de comissão (segmentos mal classificados).

Os resultados e o processo de correção de erros não foi exatamente o mesmo para KWAK. Esta área de estudo apresentou erros de comissão muito superiores (34,6%). Erradamente muitos segmentos classificados como água, referiam-se a sombras de árvores projetadas por árvores e arbustos altos e densos ou líquenes sobre afloramentos rochosos. Este índice evidenciou-se muito vulnerável à influência dessas superfícies, pelo facto de segmentos relativos a essas áreas apresentarem valores de NDWI muito semelhantes

a alguns corpos de água. Por outro lado, a percentagem relativa a erros de omissão revelou-se próxima à verificada em BGR. Em ambas as áreas de estudo, observaram-se erros de omissão especialmente em lagoas mais eutrofizadas, com maior quantidade de vegetação aquática, mais escuras e menos profundas (fig. 35).

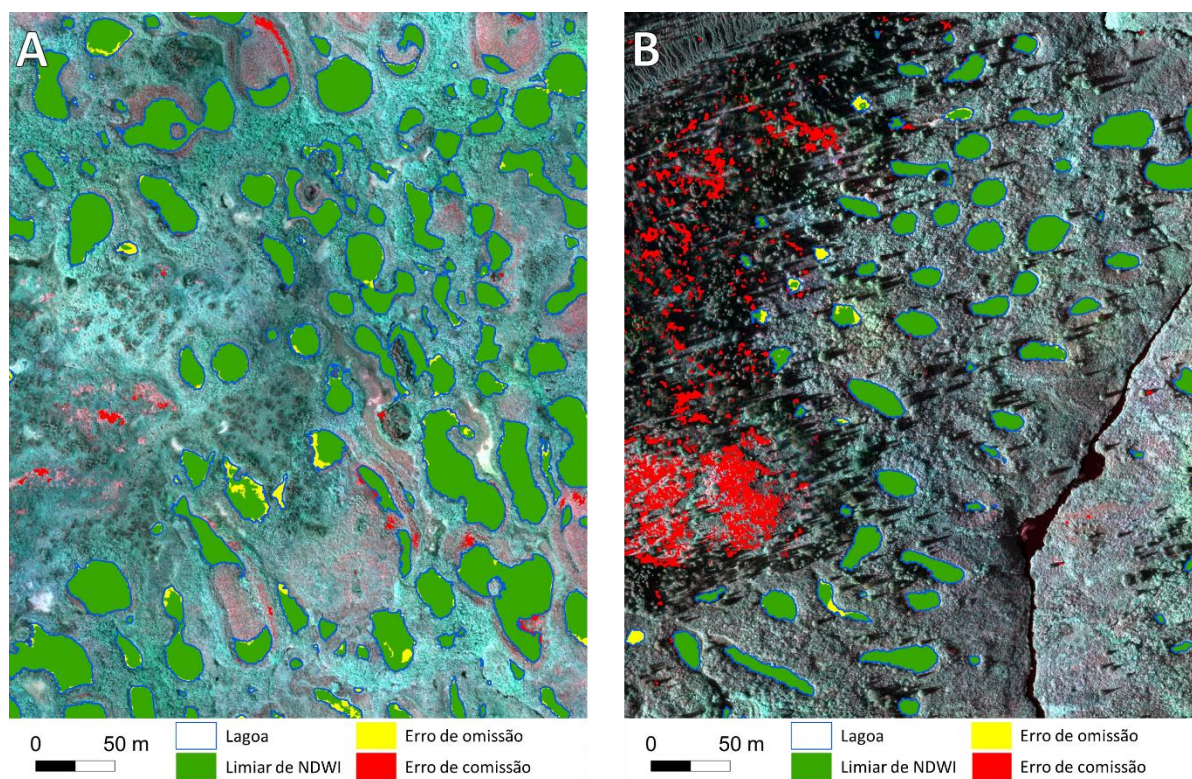


Figura 35: Erros de comissão e omissão derivados do limiar de NDWI em BGR (A) e KWAK (B)

### C. FASE 3 – AGRUPAMENTO

A terceira e última fase do processo de delimitação das lagoas na área de verdade de terreno, relativa ao agrupamento de pixéis, foi aplicada apenas para KWAK com o objetivo de delimitar áreas de lagoas afetas e não afetas à influência das sombras. Uma vez realizada a delimitação das lagoas completas (fase 1 e 2) executou-se um corte pela sua máscara ao compósito multiespectral. Apenas na área das mesmas, aplicou-se uma classificação de tipo não supervisionada, designada de *clustering K-Means*, recorrendo-se ao programa *ArcGis 10.5.1* (Dey, 2011; Jawak et al., 2015; Singh et al., 2018). Este é um tipo de classificação não supervisionado, porque não necessita de treino do classificador para a realização da classificação, sendo que tem em consideração as quebras naturais do conjunto de dados. Assim, este método agrupa pixéis com comportamento espectral semelhante na mesma classe (Singh et al., 2018).

O uso deste tipo de classificação permitiu o agrupamento de pixéis pertencentes a áreas com sombra e a áreas sem sombra, em cada lagoa. O tratamento foi realizado por inspeção visual e sucessiva fusão de polígonos nas áreas com sombra, após a conversão dos resultados de formato matricial para formato vetorial, sem simplificação. Obtiveram-se as áreas sem sombra com recurso à ferramenta “*Erase*” do *ArcGis* (o inverso da ferramenta “*Clip*”). Esta ferramenta permitiu a consideração dos limites das lagoas completas, ao criar um



novo ficheiro vetorial para as áreas sem sombra, por exclusão das áreas com sombra. No decorrer deste processo garantiu-se qualidade topológica (relação entre polígonos). Na base de dados, a relação entre os polígonos das lagoas completas e respetivas áreas com e sem sombra foi 1:n, ou seja, 1 para vários, uma vez que uma lagoa (1) pode apresentar várias áreas com sombra (n) e várias áreas sem sombra (n).

Realizaram-se várias tentativas com diferentes valores de detalhe espectral, detalhe espacial e com um mínimo de pixéis por grupo por forma a minimizar o ruído sobre a classificação. A melhor tentativa selecionada apresentou um valor de 19 como detalhe espectral e 15 como detalhe espacial. Esta tentativa apresentou um bom equilíbrio entre excessiva segmentação e coerência na delimitação das áreas pretendidas (áreas com sombra) (fig. 36).

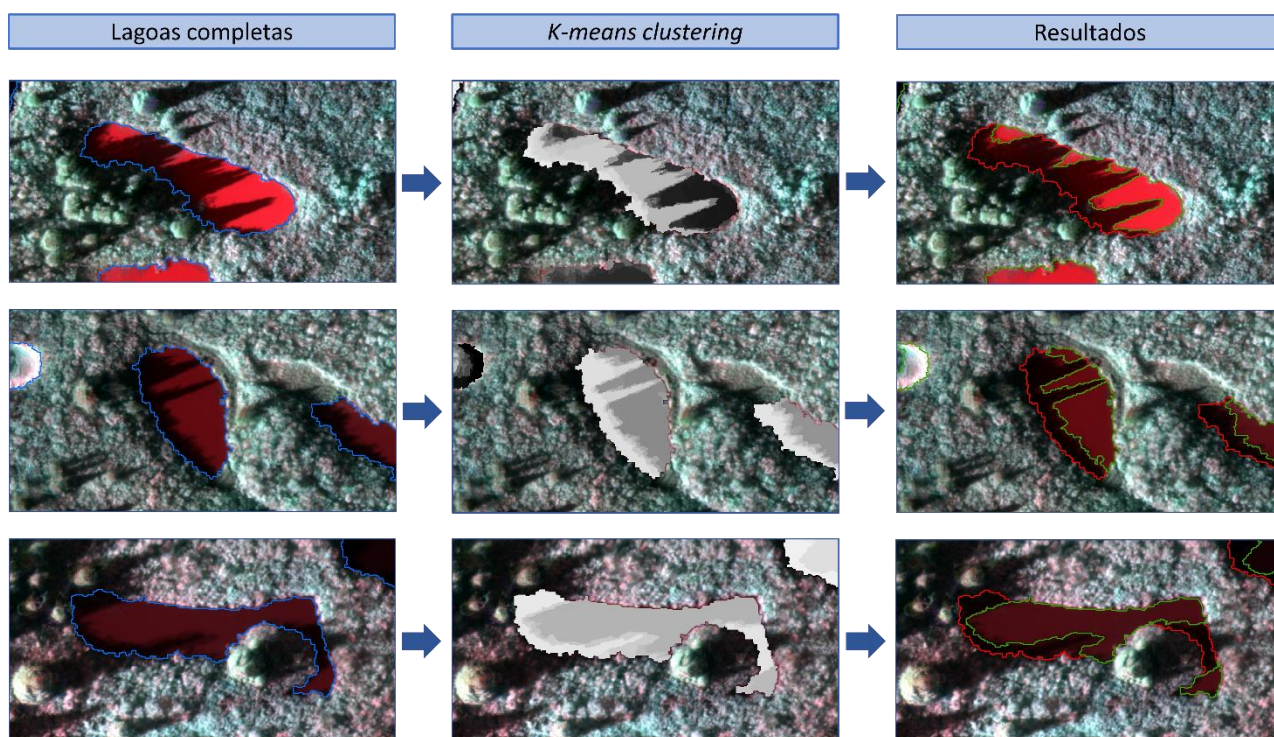


Figura 36: Resultados da aplicação e tratamento da classificação não supervisionada *clustering K-means* na área de verdade de terreno de KWAK



### 4.3. ÁREAS DE TESTE REGIONAL (VALE DE BGR E VALE DE KWAK)

Na área de teste regional utilizaram-se imagens *WorldView 2* (Vale de BGR) e *WorldView 4* (Vale de KWAK) para a extração e delimitação dos lagos e lagoas presentes numa área mais abrangente, nomeadamente em 25 km<sup>2</sup> ao longo de cada área de estudo (fig. 37).

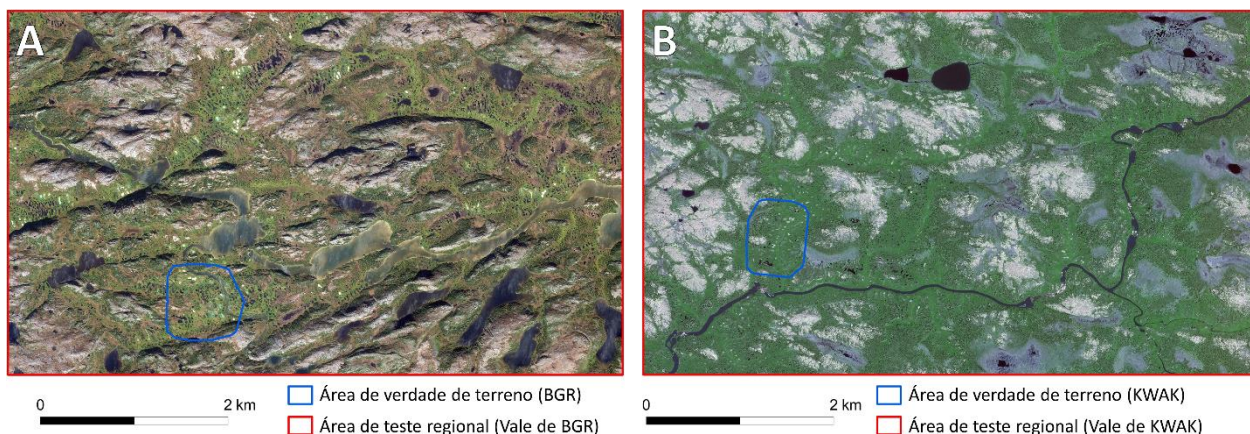


Figura 37: Enquadramento das áreas de verdade de terreno (A – BGR e B – KWAK) nas áreas de teste regional (A – Vale de BGR) e (B – Vale de KWAK)

#### 4.3.1. IMAGENS DE SATÉLITE DE MUITO ALTA RESOLUÇÃO (*WORLDVIEW 2* E *WORLDVIEW 4*)

Definem-se imagens de satélite de muito alta resolução, se estas possuírem uma resolução de pixel na ordem dos centímetros (Dey, 2011). As imagens de satélite *WorldView 2* (WV 2) apresentam, na região pancromática, uma resolução espacial de 46 centímetros e as imagens de satélite *WorldView 4* (WV 4) uma resolução espacial de 30 centímetros. O satélite WV 2 dispõe de 8 bandas multiespectrais (costeira, azul, verde, amarelo, vermelho, limite do vermelho, infravermelho próximo 1 e infravermelho próximo 2) e o satélite WV 4 dispõe de 4 bandas multiespectrais (azul, verde, vermelho e limite do vermelho).

As imagens WV 2 utilizadas correspondem à situação de 11 de setembro de 2017 e as imagens WV 4 correspondem à situação de 29 de julho de 2017. O espaçamento temporal de vários dias e meses, face aos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (31/08/2017 e 01/09/2017), impossibilitou a utilização destas imagens para a realização de comparações espectralmente corretas.

#### 4.3.2. PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE DE MUITO ALTA RESOLUÇÃO

As imagens WV 2 e WV 4 foram tratadas e processadas com o objetivo de se garantir qualidade em demais processos de análise espacial derivados. Ortorectificaram-se as imagens através do método RPC do

programa *Envi* 5.3, tendo como base os MDT *cdem\_dem\_034C* para o Vale de BGR, com resolução espacial de 50 metros e *cdem\_dem\_033 N* para o Vale de KWAK, com resolução espacial de 20 metros, do Portal de Dados Abertos do Governo do Canadá (Government of Canada, 2018). A ortorretificação não foi acompanhada da introdução de pontos de controlo, quer para retificação ou para validação, devido à fraca resolução das imagens de satélite (*Landsat*) disponibilizadas pelo *Google Earth/Maps* e falta de outros dados de referência como por exemplo, vértices geodésicos ou outros pontos de controlo fidedignos.

O processo de ortorretificação das imagens WV 4, através do método RPC do programa *Envi* 5.3 para o Vale de KWAK, garantiu qualidade e exatidão de sobreposição com as imagens de satélite S2 e L8. Assim, utilizaram-se essas imagens para a georreferenciação dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*, tendo sido verificadas deformações internas nas lagoas. Por outro lado, o mesmo processo revelou-se insuficiente para as imagens WV 2 no Vale de BGR. Mediante ortorretificação, verificou-se um pequeno desvio face às imagens L8 e S2. Para a resolução deste problema, recorreu-se à ferramenta *Shift* do programa *ArcGis 10.5.1*, de modo a se executar uma transformação de tipo linear sobre o compósito multiespectral das imagens WV 2.

Utilizaram-se as imagens WV 2 e WV 4 apenas para a extração e delimitação dos lagos e lagoas presentes ao longo do vale de ambas as áreas de estudo. Dado que não se utilizaram as mesmas para a extração de dados relativos à reflectância das diferentes bandas, derivação de variáveis biofísicas ou índices, nem para comparação com outras imagens de satélite, um modelo de correção atmosférica revelou-se dispensável (Song et al., 2001). Para além deste facto, considerando a disponibilidade de programas existentes para a implementação deste tipo de correções atmosféricas, verificou-se que o algoritmo S6 do programa *GRASS GIS 7.2.2* não dispunha, compatibilidade com imagens de satélite WV 4, apenas WV 2. Este problema foi também constatado com o *Envi* 5.3. Este facto introduziu a impossibilidade de corrigir atmosféricamente as imagens WV 4 através da ferramenta *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH) deste programa, depois de calibração radiométrica.

#### 4.3.3. DELIMITAÇÃO DOS LAGOS E LAGOAS

Extraíram-se os lagos e lagoas das imagens multiespectrais de muito alta resolução WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional, através de um procedimento idêntico ao utilizado para os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* nas áreas de verdade de terreno, à exceção da terceira fase que se revelou dispensável (fig. 38). Ao contrário dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*, nas imagens WV a influencia das sombras projetadas por elementos presentes na superfície terrestre, apesar de existir, devido à sua resolução, não é tão evidente, impossibilitando a sua delimitação sobre as lagoas.

Numa primeira fase, segmentaram-se os compósitos multiespectrais por forma a delimitar os corpos de água, sendo que numa segunda fase classificaram-se os segmentos suscetíveis de serem corpos de água. Neste processo utilizaram-se duas variáveis, de forma faseada, para o estabelecimento de limiares sobre a

classificação, nomeadamente o NDWI e a *Brighness*, respetivamente. Por inspeção visual assegurou-se qualidade no processo de classificação.

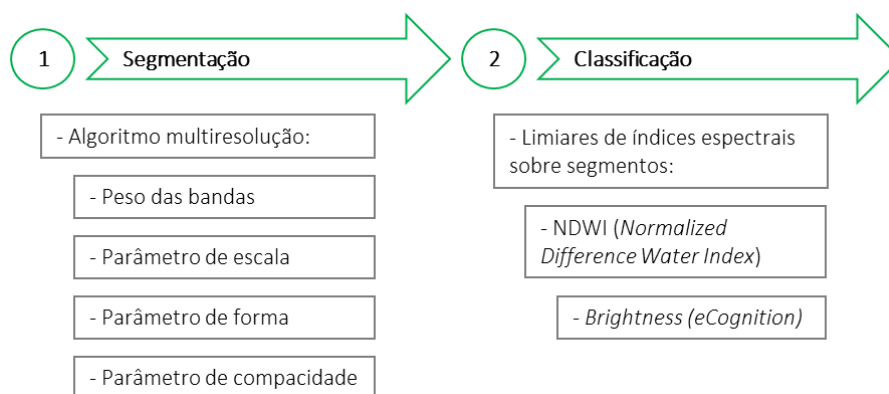


Figura 38: Fases, métodos e índices para a delimitação dos lagos e lagoas nas áreas de teste regional (Vale de BGR e de KWAK)

## A. FASE 1 – SEGMENTAÇÃO

Recorreu-se ao algoritmo multiresolução do programa *eCognition Developer 9.0* para segmentar os compósitos multiespectrais WV 2 e WV 4. No decorrer deste processo utilizaram-se todas as bandas dos respetivos satélites em compósitos multiespectrais e parâmetros de configuração do algoritmo diferenciados para o Vale de BGR (fig. 39) e de KWAK (fig. 40).

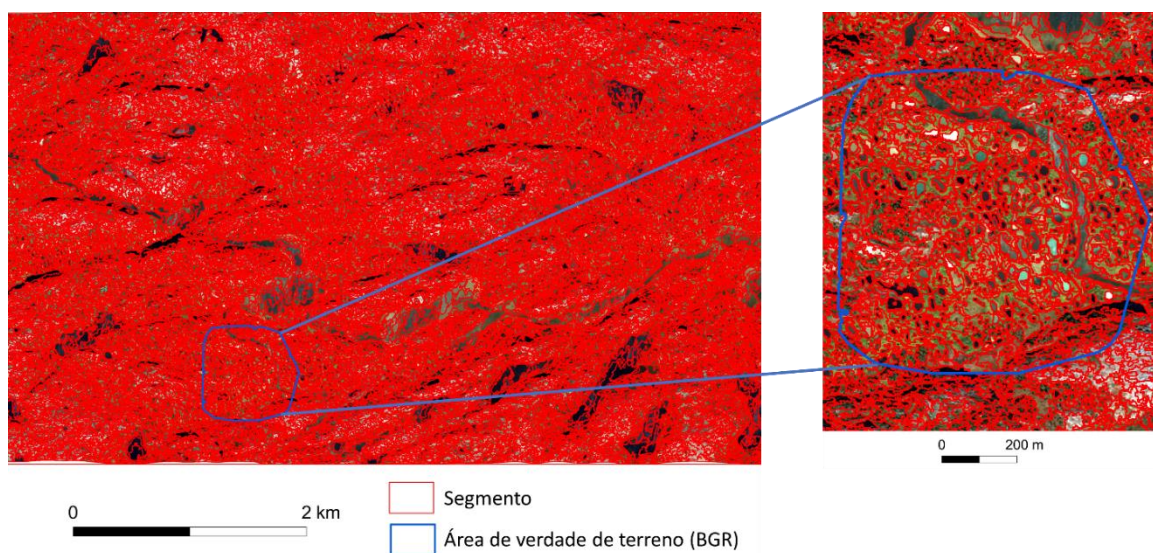


Figura 39: Fase 1 – Segmentação através do algoritmo multiresolução no Vale de BGR

O parâmetro relativo à forma revelou-se o mais importante, de modo a delimitar corretamente os corpos de água. No Vale de BGR, a segmentação foi realizada com um parâmetro de escala de 3,5, parâmetro de forma de 0,0001 e parâmetro de compacidade de 0,1. No Vale de KWAK, a segmentação foi realizada com um parâmetro de escala de 5, parâmetro de forma de 0,1 e parâmetro de compacidade de 0,4. O parâmetro de escala mais baixo no Vale de BGR permitiu o ajuste dos segmentos aos corpos de água de forma mais eficaz.



Tal como nos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*, ponderou-se ainda a utilização de pesos diferenciados nas bandas infravermelho próximo de ambos os compósitos multiespectrais, face às restantes bandas.

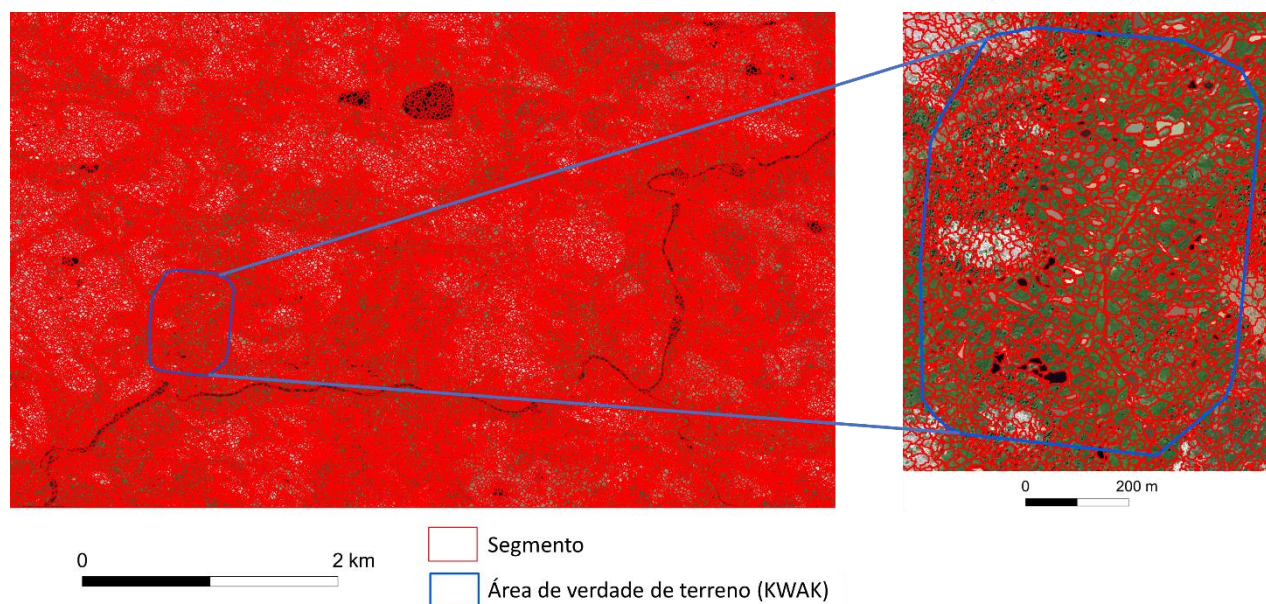


Figura 40: Fase 1 – Segmentação através do algoritmo multiresolução no Vale de KWAK

## B. FASE 2 – CLASSIFICAÇÃO

A classificação dos segmentos ocorreu de forma faseada. No primeiro passo, realizou-se a definição de um limiar de NDWI sobre o valor médio dos segmentos, o que permitiu a seleção dos segmentos de corpos de água prováveis. Este primeiro passo foi também acompanhado da eliminação de alguns segmentos falsos positivos, através de um limiar de *Brigthness* (fig. 41).

Ponderaram-se valores de limiar diferenciados para ambas as variáveis (NDWI e *Brigthness*), com o objetivo de se obterem os melhores resultados, indo ao encontro das diferentes características de lagos e lagoas presentes ao longo dos vales de cada área de estudo.

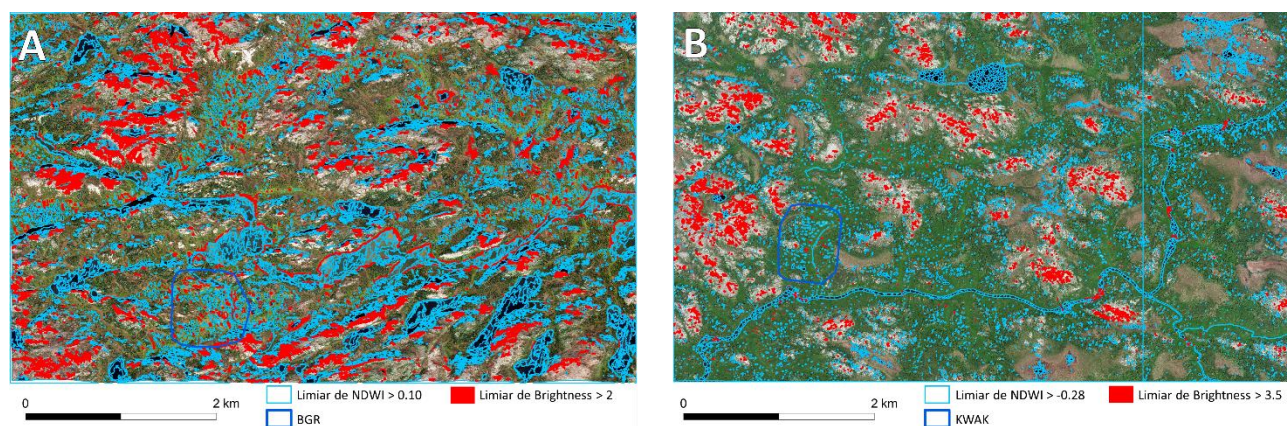


Figura 41: Classificação dos segmentos suscetíveis de serem corpos de água com limiar de NDWI e segmentos eliminados com limiar de Brightness no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B)

Aquando do processo de definição do limiar de NDWI assegurou-se a inclusão de todos os segmentos suscetíveis de serem corpos de água. O limiar de NDWI resultou na seleção de 25,8% da área total do Vale de BGR e 7,6% da área total do Vale de KWAK. Após a definição do limiar de NDWI, sobre os segmentos classificados, definiu-se um limiar de *Brightness*. Mediante inspeção visual, não se eliminaram alguns segmentos por se referirem a corpos de água, facto comprovado através de inspeção visual dos resultados obtidos (< 0,5% dos segmentos em ambas as áreas de estudo). Na generalidade, o estabelecimento deste limiar permitiu a eliminação de segmentos relativos a afloramentos rochosos e planícies aluviais arenosas ao longo de alguns cursos de água (tabela 4).

Tabela 4: Contabilização da área e percentagem de área nos diferentes passos utilizados para a classificação dos segmentos

|  | BGR                    |      | KWAK                   |     |
|--|------------------------|------|------------------------|-----|
|  | Área (m <sup>2</sup> ) | %    | Área (m <sup>2</sup> ) | %   |
| Vale                                     | 25 447 436             | 100  | 25 401 639             | 100 |
| Seleção por limiar de NDWI               | 6 552 784              | 25,8 | 1 922 737              | 7,6 |
| Exclusão por limiar de <i>Brightness</i> | 1 368 752              | 5,4  | 530 345                | 2,1 |
| Corpos de água                           | 3 177 549              | 12,5 | 771 519                | 3,0 |
| Tratamento por fotointerpretação         | 2 006 483              | 7,9  | 620 873                | 2,4 |

Após a classificação dos segmentos suscetíveis de serem corpos de água, com a definição do limiar de NDWI e *Brightness*, realizou-se a fusão de segmentos contíguos relativos a corpos de água (fig. 42). Neste processo contabilizaram-se segmentos de corpos de água relativos a cursos de água.

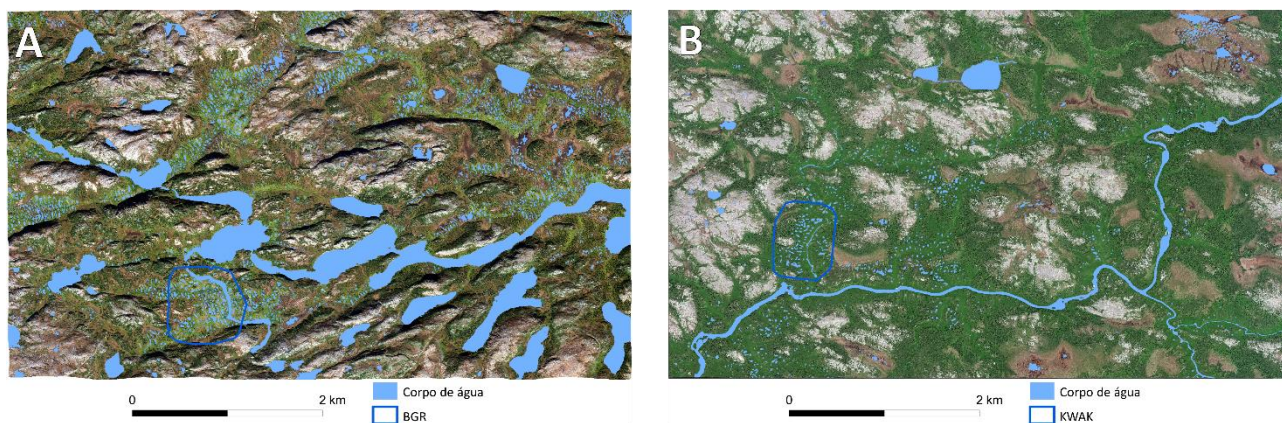


Figura 42: Tratamento por fotointerpretação e fusão de segmentos relativos a todos os corpos de água no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B)

Dada a importância da delimitação de apenas lagos e lagoas no âmbito desta dissertação, procedeu-se à eliminação dos polígonos relativos a cursos de água. Utilizou-se informação auxiliar no decorrer deste processo de inspeção visual, através da derivação dos cursos de água tendo como base o MDT do Portal de Dados Abertos do Canadá (Government of Canada, 2018) para ambas as áreas de teste regional. O MDT apresentou resolução menor no Vale de BGR (maior latitude – 50 metros de resolução espacial)



comparativamente a KWAK (menor latitude – 20 metros de resolução espacial), o que se traduziu numa menor precisão na localização e delimitação dos cursos de água (fig. 43) (Government of Canada, 2016).

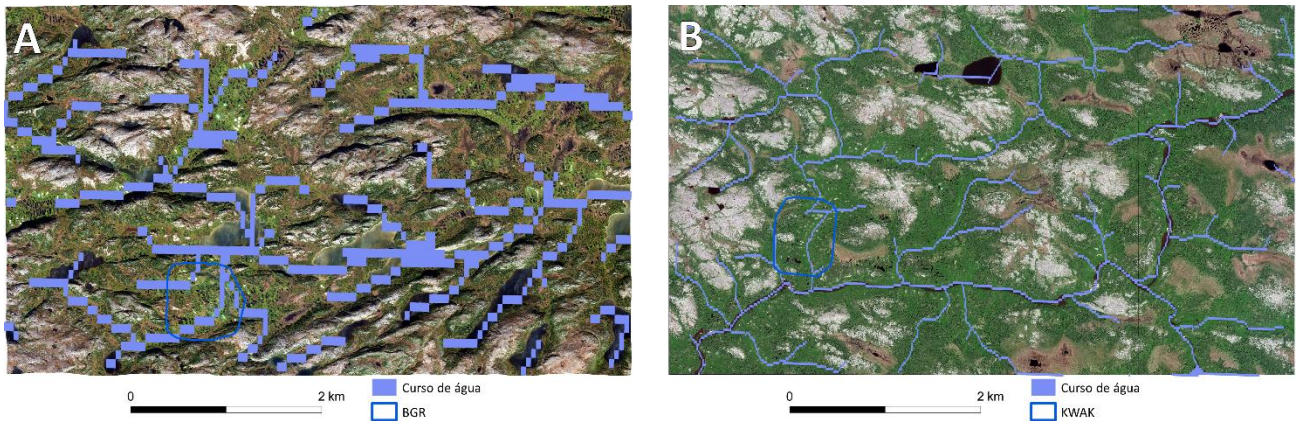


Figura 43: Cursos de água originados a partir do MDT (Government of Canada, 2018) para eliminação de polígonos relativos a cursos de água no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B)

Por fim, através de uma operação de seleção espacial e de um processo de verificação exaustiva por inspeção visual, eliminaram-se todos os polígonos relativos a cursos de água, obtendo-se apenas os lagos e lagoas (fig. 44).

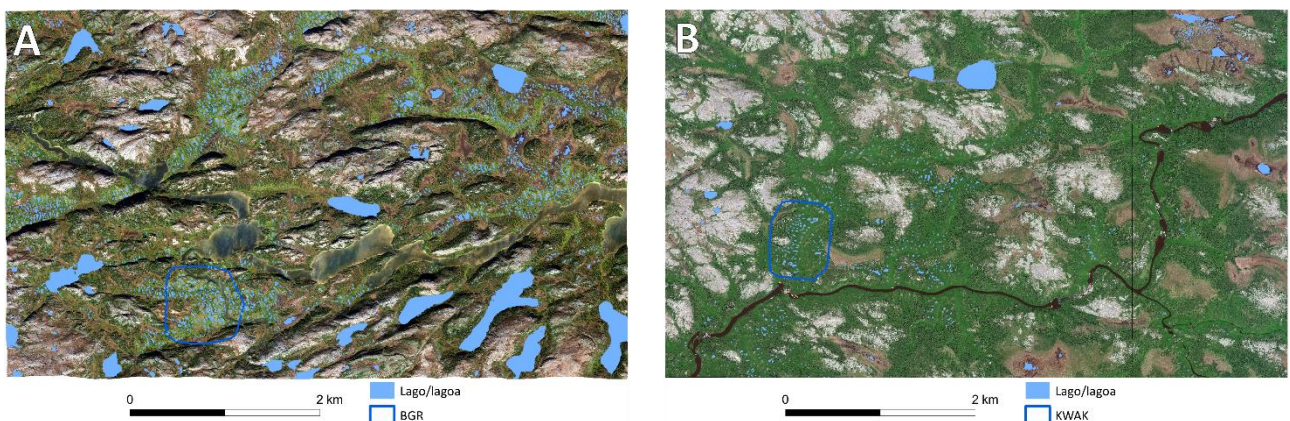


Figura 44: Lagos e lagoas no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B)

## 4.4. IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO (LANDSAT 8 E SENTINEL-2)

### 4.4.1. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO

As imagens de satélite L8 e S2 dispõem de vários níveis de processamento por parte da USGS e da ESA, respetivamente, mediante a sua aquisição pelos sensores instalados nesses satélites. Esses níveis de processamento, que geralmente vão do nível 0, aos níveis 1, 2 e 3, compreendem diferentes fases de qualidade do produto. As imagens de nível 1 são georreferenciadas, sendo que aquando da sua passagem para nível 2, é realizada a correção atmosférica. Esta correção pode ser realizada, por parte dos utilizadores, recorrendo a modelos de correção atmosférica, em programas gratuitos ou comerciais, dependendo das exigências e objetivos de determinado trabalho. Depois de minimizada a influência das partículas presentes na atmosfera, ao nível da dispersão e absorção da energia que é refletida pela luz solar, incidente na superfície terrestre e retransmitida e capturada pelos sensores dos satélites, as imagens das diferentes bandas referir-se-ão à reflectância dos objetos presentes na superfície terrestre, em determinados comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Song et al., 2001) (fig. 45).

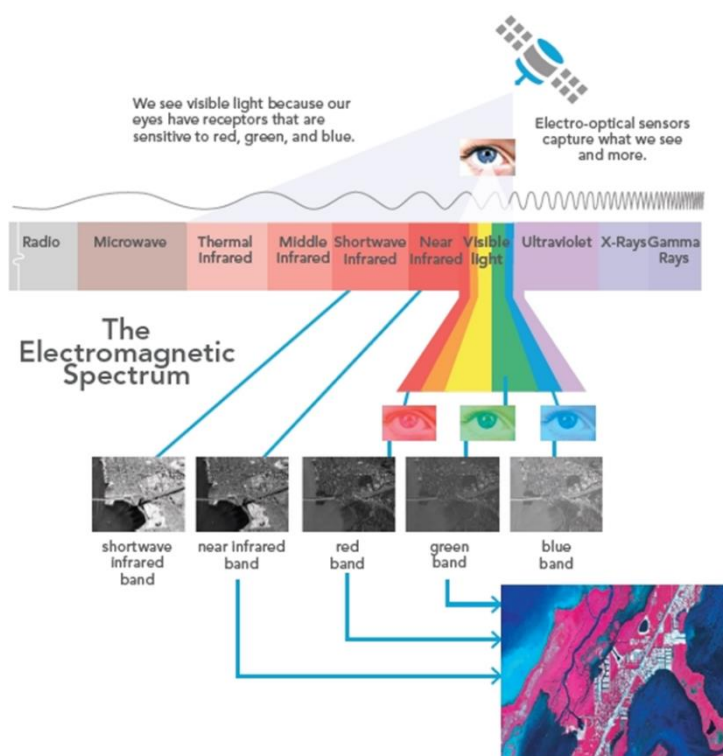


Figura 45: O espectro eletromagnético (Esri Press, 2016)

As imagens L8 nível 2 utilizadas nesta dissertação referem-se à Reflectância da Superfície do sensor OLI (*Operational Land Imager*), sendo estas especialmente direcionadas para a monitorização da superfície terrestre (USGS (A), 2017). Realizou-se a sua encomenda no sítio de internet *Earth Explorer*. As imagens L8

utilizadas referem-se à situação do dia 25 de agosto de 2017, o que corresponde a um espaçamento de cerca de 7 dias face aos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* em ambas as áreas de verdade de terreno (KWAK e BGR). O satélite L8 está sincronizado com o sol, através de uma órbita quase polar, sendo às 10:11 a Hora Local no Nodo Descendente. Ao contrário das imagens S2, utilizaram-se as imagens L8 apenas para este período temporal, com o objetivo de se estabelecer o limiar mínimo dimensional a partir do qual as imagens deste sensor podem ser utilizadas para a caracterização espectral das lagoas.

Relativamente às imagens de satélite S2, recorreu-se à aplicação de um modelo físico de correção atmosférica (*Sen2Cor*) às imagens de nível 1, depois de realizado o seu descarregamento no repositório *Earth Explorer*. Utilizaram-se as imagens S2 para dois objetivos, nomeadamente para o estabelecimento do limiar mínimo dimensional das lagoas, tal como as imagens L8, mas também para a monitorização das características espectrais intra-anuais dos lagos e lagoas ao longo de um ano nos Vales de BGR e KWAK (áreas de teste regional). Este período teve de ser alargado para o Vale de BGR a todas as cenas existentes desde o lançamento do satélite até maio de 2018. Nesta área de estudo verificaram-se muitas imagens contaminadas pelas nuvens. Apesar da extensão do período de análise, verificaram-se apenas 12 imagens sem nuvens, sendo 3 delas fora do período com neve no solo e 9 durante o período com neve no solo. Por outro lado, para o Vale de KWAK, de 31 de agosto de 2017 a 31 de agosto de 2016, recolheram-se 12 imagens sem nuvens, 6 das quais fora do período com neve no solo e 6 durante o período com neve no solo. As imagens S2 utilizadas para o estabelecimento do limiar mínimo de deteção das lagoas, referem-se à situação de 23 de agosto de 2017 o que corresponde a um espaçamento de cerca de 9 dias face aos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*. Ambos os satélites S2-A e S2-B estão sincronizado com o sol, sendo às 10:30 a Hora Local no Nodo Descendente.

#### 4.4.2. PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO

Segundo a USGS (B) (2017) as imagens de satélite L8 nível 2 estão corrigidas em termos atmosféricos. Como tal, partir do método implementado pela USGS (USGS, 2018), torna desnecessárias medidas adicionais, por forma a que se obtenha os dados relativos à reflectância dos elementos presentes na superfície terrestre, da forma mais precisa possível. O passo final ao nível do tratamento e processamento das imagens L8, consistiu apenas na multiplicação de cada banda pelo seu fator de escala (0,0001), o que permitiu a obtenção da razão de percentagem de cada pixel em cada banda (tabela 5).

Por outro lado, para a correção das imagens S2 nível 1 (Radiância no Topo da Atmosfera), procedeu-se à implementação de um modelo físico de correção atmosférica (*Sen2Cor*). Os sinais de radiação eletromagnética do espectro solar, recolhidos pelos sensores dos satélites, são modificados devido à dispersão e absorção provocada por gases e aerossóis, fruto da sua penetração na atmosfera, desde a superfície terrestre até ao sensor (Song et al., 2001). Efeitos adicionais da atmosfera, temporalmente variáveis, devem



ser removidos ou amenizados, para que imagens provenientes de diferentes datas e sensores, fiquem espectralmente comparáveis (Brunn et al., 2004). Para além das condições atmosféricas, diferenças na geometria solar e efeitos topográficos podem influenciar de forma substancial os sinais recolhidos pelos sensores. Assim, o objetivo da correção atmosférica consiste na eliminação ou minimização de efeitos atmosféricos, consideração de diferenças na direção da iluminação e na conversão dos dados de radiância no sensor (Topo da Atmosfera) para reflectância (Atmosfera Inferior, Reflectância da Superfície ou Reflectância da Superfície do Solo) (Brunn et al., 2004).

Tabela 5: Bandas de Reflectância de Superfície do satélite *Landsat 8* (L8) do sensor OLI (*Operational Land Imager*)

| Bandas de Reflectância de Superfície      | Resolução espectral (nm) | Resolução espacial (m) |
|---|--------------------------|------------------------|
| Banda 1 – Ultra azul (costeira/aerossol)  | 435 – 451                | 30                     |
| Banda 2 – Azul                            | 452 – 512                | 30                     |
| Banda 3 – Verde                           | 533 – 590                | 30                     |
| Banda 4 – Vermelho                        | 636 – 673                | 30                     |
| Banda 5 – Infravermelho próximo           | 851 – 879                | 30                     |
| Banda 6 – Infravermelho de ondas curtas 1 | 1566 – 1651              | 30                     |
| Banda 7 – Infravermelho de ondas curtas 2 | 2107 – 2294              | 30                     |

Existem vários modelos de correção atmosférica, que devem ser aplicados nas imagens de satélite de nível 1. Estes modelos podem ser separados em duas principais categorias: estatísticos e físicos. Os modelos estatísticos são menos complexos e realistas, comparativamente aos modelos físicos. Estes últimos, têm em consideração as condições atmosféricas aquando da captação das imagens pelos sensores, através de bibliotecas de comportamentos radiativos da superfície terrestre e da atmosfera. Alguns destes modelos têm ainda em consideração diferentes superfícies topográficas e diferenças na direção da iluminação. Por outro lado, os modelos estatísticos, têm em consideração apenas os dados presentes nas imagens para a realização da correção, ignorando as condições da atmosfera aquando da aquisição das imagens por parte dos sensores, bem como fatores tais como, efeitos na direção da iluminação e variações topográficas (Brunn et al., 2004).

Os modelos físicos de correção atmosférica, são regra geral, complexos, sendo que são implementados, sobretudo, em programas comerciais, como o *ENVI* e o *AtCor 2/3*. Estes programas e respetivas ferramentas, têm em consideração uma biblioteca de comportamentos radiativos da atmosfera e da superfície terrestre, como por exemplo a biblioteca *MODTRAN* da ferramenta *FLAASH* do programa *ENVI*, ou a biblioteca *libRadtran* do programa *Sen2Cor*. Alguns destes programas, têm ainda em consideração a influência do relevo e da sua rugosidade na alteração dos valores de reflectância dos pixéis, ao considerarem o MDT da área de estudo. Estes permitem a consideração de fatores como, a exposição das vertentes e as sombras projetadas pelas mesmas, bem como diferenças na direção da iluminação, algo que não se verifica no *ENVI*, ao contrário do *AtCor 2/3* e do *Sen2Cor*. O *Sen2Cor* e o *GrassGIS* são dos poucos programas gratuitos, que oferecem um modelo de correção atmosférica físico. O *GrassGIS*, através da sua ferramenta e algoritmo

de correção 6S (i.atcorr), baseia-se na biblioteca *MODTRAN*, à semelhança do programa comercial *AtCor 2/3* e *ENVI*, sendo que pode ser aplicado a uma enorme variedade de imagens de satélite (*WorldView*, *L8*, *Spot*, *Pleiades*, entre outros), ao contrário do *Sen2Cor* que pode ser aplicado, apenas, a imagens multiespectrais do S2.

Selecionou-se o *Sen2Cor* como modelo físico de correção atmosférica para todas as imagens de satélite S2 de nível 1 utilizadas. Toming et al (2016) defenderam que o *Sen2Cor* não é direcionado para a realização de uma correção atmosférica correta sobre corpos de água, sendo que detetaram correlações mais fortes com os dados de verdade de terreno não utilizando este algoritmo. Apesar deste facto, nesta dissertação, opta-se pela utilização do *Sen2Cor* sobre todas as imagens S2, uma vez que os dados de verdade de terreno (ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*) foram obtidos a baixa altitude (110 metros do solo) e sem a influência de efeitos atmosféricos que possam ser, na generalidade, comparáveis com os dados obtidos pelos sensores dos satélites (quilómetros de distância).

A aplicação do *Sen2Cor* teve como base a ferramenta *Python Sen2Cor Stand-Alone Installers*, desenvolvida pela ESA. Esta ferramenta pode também ser executada como *plugin* no programa SNAP (*Sentinel Application Platform*) desenvolvido pela ESA. No entanto, a versão *Stand-Alone Installers*, revela-se mais simples de ser executada, porque não requer a instalação de uma série de dependências *a priori*, entre as quais a versão *Python Anaconda*. A ferramenta *Sen2Cor*, inspirada na ferramenta comercial *AtCor 2/3*, é constituída por um conjunto de algoritmos complexos direcionados exclusivamente ao processamento de imagens S2. Realiza a passagem de todas as bandas (à exceção da banda cirrus porque não constitui informação terrestre) nível 1 (Topo da Atmosfera) para nível 2, Atmosfera Inferior, sendo o equivalente à Reflectância de Superfície das imagens L8 (tabela 6) (Richter et al., 2011).

A aplicação do *Sen2Cor* compreende duas fases, sendo a primeira a classificação automática da cena e a segunda a aplicação do modelo de correção atmosférica (Richter et al., 2011; Louis et al., 2017). A classificação da cena tem em consideração algoritmos que permitem diferenciar neve de nuvens, detetar nuvens do tipo cirrus e sombras projetadas pelas mesmas, ao partir da utilização de uma metodologia assente em redes neuronais (*Self-Organizing Feature Map*). Este processo de classificação é acompanhado do estabelecimento de limiares sobre índices espectrais, entre os quais o NDSI (*Normalized Difference Snow Index*), NDVI e diversos rácios entre bandas (Richter et al., 2011). Um dos resultados desta primeira fase, é um mapa de ocupação do solo, que pode apresentar no máximo 12 classes (fig. 46).

A segunda fase é relativa à correção atmosférica. O programa baseia-se na biblioteca de cálculos de transferência radiativa *libRadtran* (Emde et al., 2016). Possibilita a introdução de um MDT por forma a corrigir áreas de sombra provocadas pelo relevo, remove cirrus pouco espessos, atenua a influência da sombra das nuvens e aplica correção BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Aquando da execução da ferramenta *Python* através da linha de comandos do *Windows*, um ficheiro chamado *L2A\_GIPP.xml* é criado num diretório previamente revelado. Alguns parâmetros podem ser configurados pelo utilizador recorrendo a este ficheiro .xml. Os parâmetros são relativos ao tipo de aerossol (rural, marítimo...), ao conteúdo do ozono,

entre outros. Se alguns destes parâmetros forem deixados como “Auto” o programa procurará a solução ótima ao considerar o ficheiro de metadados das imagens de satélite, sendo, no entanto, mais exigente em termos computacionais. É também neste ficheiro .xml que se aplica a correção do cirrus e correção BRDF, entre outros parâmetros (Louis et al., 2017).

Tabela 6: Bandas de Atmosfera Inferior do sensor do satélite *Sentinel-2* (S2)

| Bandas de Atmosfera Inferior              | Resolução espectral (nm) | Resolução espacial (m) |
|---|--------------------------|------------------------|
| Banda 1 – Costeira (aerossol)             | 421 – 457                | 60                     |
| Banda 2 – Azul                            | 439 – 535                | 10                     |
| Banda 3 – Verde                           | 537 – 582                | 10                     |
| Banda 4 – Vermelho                        | 646 – 685                | 10                     |
| Banda 5 – Limite do vermelho da vegetação | 694 – 714                | 20                     |
| Banda 6 – Limite do vermelho da vegetação | 731 – 749                | 20                     |
| Banda 7 – Limite do vermelho da vegetação | 768 – 796                | 20                     |
| Banda 8 – Infravermelho próximo           | 767 – 908                | 10                     |
| Banda 8A – Infravermelho próximo estreito | 848 – 881                | 20                     |
| Banda 9 – Vapor de água                   | 931 – 958                | 60                     |
| Banda 11 – Infravermelho de ondas curtas  | 1539 – 1681              | 20                     |
| Banda 12 – Infravermelho de ondas curtas  | 2072 – 2312              | 20                     |

Depois de processadas todas as imagens com o *Sen2Cor*, dividiram-se todas as bandas pelo seu fator de escala (10 000) por forma a se obterem os valores de reflectância para as mesmas (razão de percentagem). Valores superiores a 100%, podem ser verificados nas diversas bandas, sobretudo em áreas onde se verifiquem nuvens densas (muita reflexão).

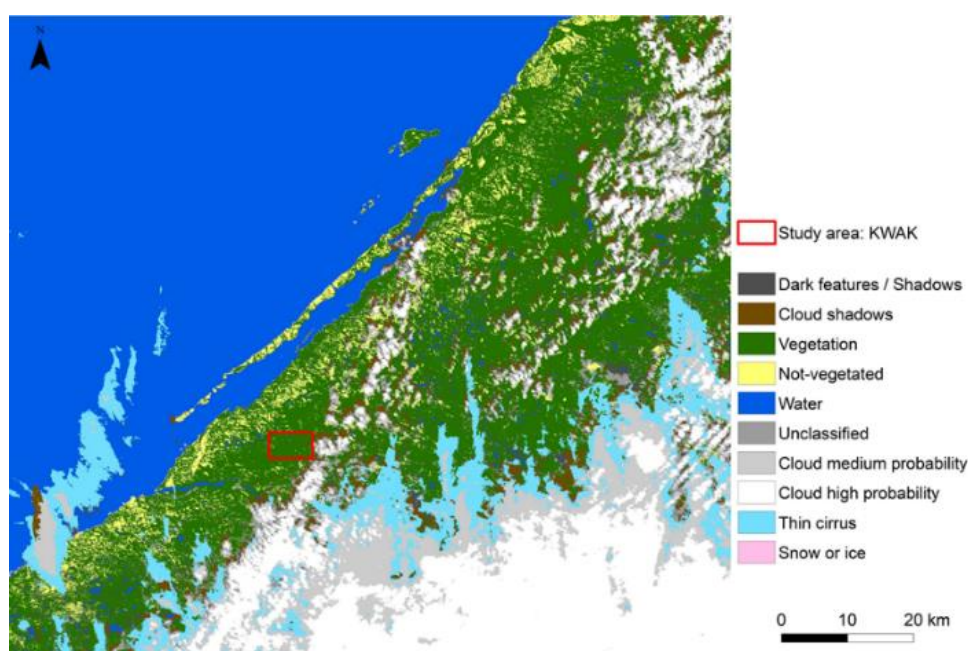


Figura 46: Exemplo da classificação automática da cena através do *Sen2Cor* numa coleção de imagens S2 (fase 1 do processamento)

## A. ERROS DE REGISTO E SOBREPOSIÇÃO ENTRE IMAGENS SENTINEL-2

Utilizaram-se imagens multiespectrais de ambos os satélites S2-A/2-B para a monitorização intra-anual das características espectrais dos lagos e lagoas, em ambas as áreas de teste regional. Descarregaram-se, compilaram-se e trataram-se um conjunto de imagens relativas a diferentes datas. Aquando deste processo, verificaram-se diversos erros de registo e falta de sobreposição entre imagens destes satélites (S2-A/2-B), considerando diferentes datas de aquisição para a mesma área, em ambas as áreas de teste regional.

Define-se como registo de imagens o processamento de imagens digitais por forma a ser atingido um alinhamento preciso entre duas ou mais imagens digitais do mesmo objeto, ou da mesma área, possibilitando a realização de análises e comparações entre as mesmas de forma correta (Zitová & Flusser, 2003; Moigne et al., 2018). O registo de imagens é uma tarefa complexa porque as imagens remotas, regra geral são multitemporais (relativas a diferentes datas), multifontes (derivadas de múltiplas plataformas), multimodais (adquiridas através de diferentes modalidades de aquisição) e para além de tudo isto, podem ser capturadas de diferentes ângulos de visão (Zitová & Flusser, 2003; Moigne et al., 2018). O registo de imagens é imprescindível numa multiplicidade de áreas científicas (deteção remota, visão computacional, medicina, etc.), sendo que a falta de alinhamento entre diferentes imagens do mesmo objeto ou área, evidencia um erro de registo dessas imagens, e consequentemente contribui para a criação de equívocos, em demais análises comparativas derivadas (Zitová & Flusser, 2003).

A especificação de desempenho de geolocalização das imagens S2-A é de 12,5 metros e das imagens L8 é de 12 metros, sendo que entre estes sensores há um desalinhamento de mais de 10 metros por pixel em algumas situações (Yan et al., 2016). Estes sensores baseiam-se em abordagens paramétricas considerando a modelação da geometria da deteção e parâmetros de medição da orientação externa do sensor (altitude e posição), sendo que utilizam, no entanto, diferentes MDT e diferentes pontos de controlo terrestres para refinar a geolocalização das imagens (Yan et al., 2016). Assim, enquanto a geolocalização do satélite L8 se baseia numa amostra global de pontos de controlo terrestres derivados de uma coleção de imagens *Landsat* de data única, sem cobertura de nuvens (*Global Land Survey*), a geolocalização do S2-A ainda está a ser aprimorada, sendo que irá basear-se numa imagem de referência global derivada de um conjunto ortorretificado de imagens sem cobertura de nuvens desse mesmo satélite (Yan et al., 2016). Apesar de termos encontrado referências relativas ao desalinhamento entre imagens L8 e S2 (visualmente não perceptíveis nas áreas de estudo), no decorrer do tratamento das imagens S2, verificou-se um desalinhamento de vários metros entre diferentes cenas de ambos os satélites S2 (S2-A/S2-B), para a mesma área (fig. 47).

O processo de registo das imagens pode ser manual ou automático, através da correspondência entre objetos, cálculo de métricas de similaridade, entre outros (Yan et al., 2016; Moigne et al., 2018). Após pesquisa sobre o problema, verificou-se a falta de relatos sobre o mesmo entre imagens dos satélites S2-A e S2-B. Comunicou-se o problema no STEP Fórum da ESA. Recebeu-se como resposta de um técnico que o problema é sobretudo verificado em cenas do S2-B, de órbita descendente, e que deve aplicar-se uma transformação

linear de até um pixel (10 metros), exceto em áreas montanhosas em que a transformação poderá ter de ser mais complexa e cuidada. Está ainda a ser desenvolvida uma atualização para o programa SNAP tendo em vista a resolução deste problema. Assim, nas imagens do S2-A e S2-B com problemas de registo, optou-se por executar um tipo de registo manual através da execução de uma transformação linear, de até 10 metros.

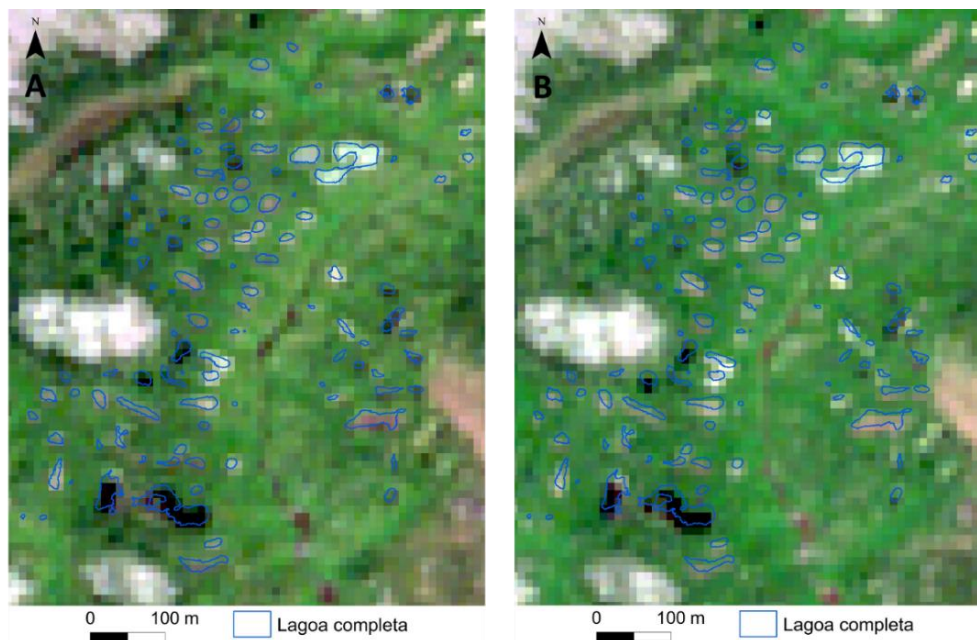


Figura 47: Exemplo de erro de registo entre as imagens dos satélites S2-A e S2-B – A: Compósito de cor verdadeira do satélite S2-A de 23/08/2017; B: compósito de cor verdadeira do satélite S2-B de 29/07/2017

O Vale de BGR encontra-se no limite de duas faixas de varrimento dos satélites S2-A e S2-B, o que impossibilitou a consideração destas imagens no desenvolvimento desta dissertação. Neste vale verificou-se que os erros de sobreposição são particularmente mais significativos nas extremidades de algumas imagens. Este fator introduz a necessidade de tratar os lagos e lagoas nesta área de forma mais cuidada, uma vez que, na maior parte das situações, os espaçamentos temporais entre imagens disponíveis, sem cobertura de nuvens, referem-se a várias semanas e até meses (fig. 48).

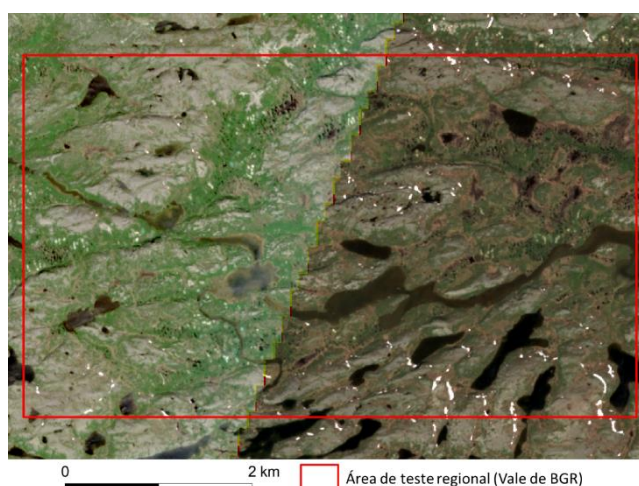


Figura 48: Contacto entre duas imagens dos satélites S2-A de 07/07/2017 (esquerda) e S2-A de 21/06/2017 (direita)

## 4.5. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DA REFLECTÂNCIA

Os dados de reflectância das imagens dos diferentes sensores (*Sequoia*, *Landsat 8* e *Sentinel-2*) foram obtidos através de vários métodos, os quais são aqui designados por Método 1 (M1) e Método 2 (M2), seguidos da sigla referente ao sensor: S (*Sequoia*), L8 (*Landsat 8*) e S2 (*Sentinel-2*) (fig. 49).

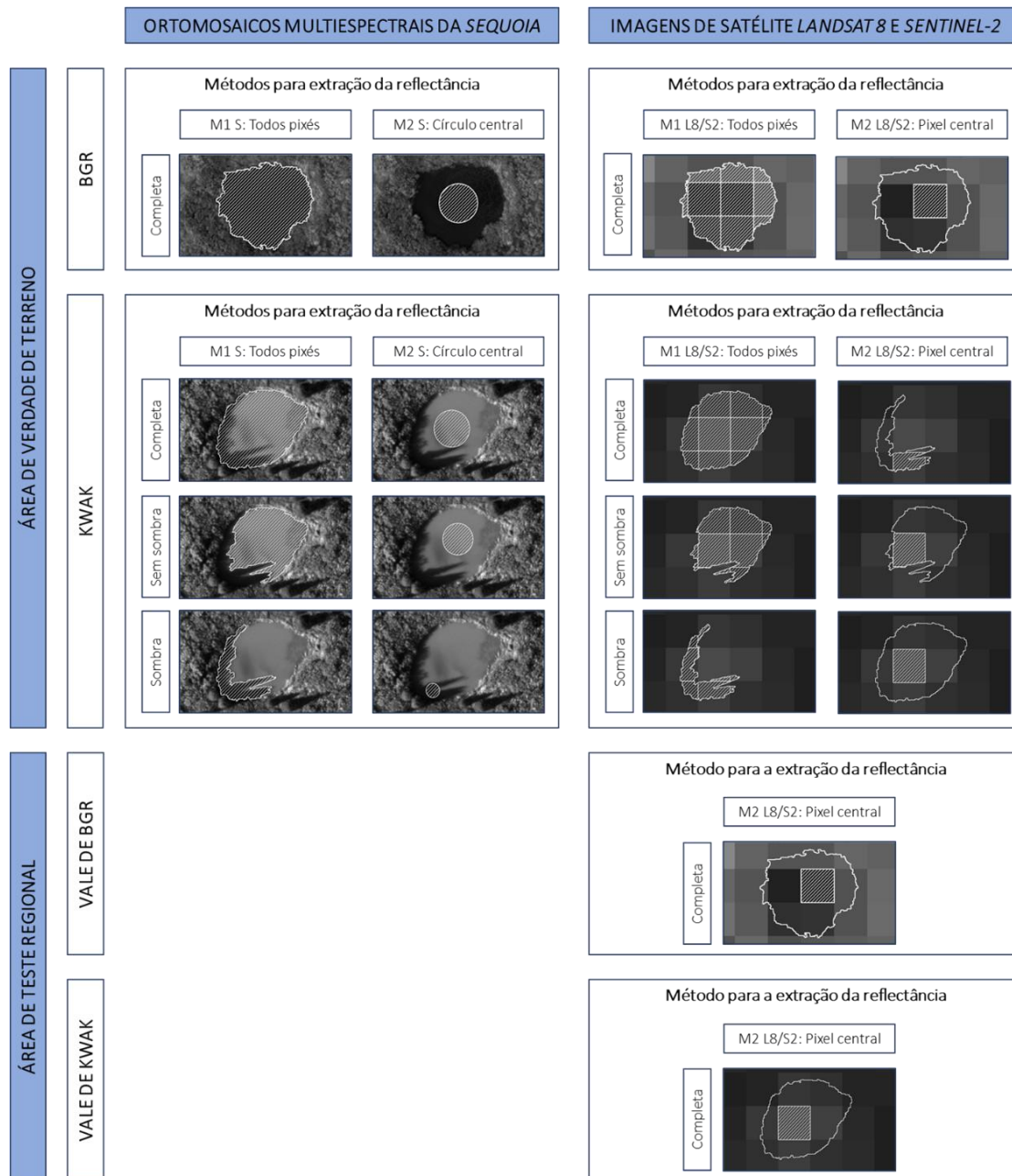


Figura 49: Métodos utilizados para a extração dos valores de reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (dados de verdade de terreno) e das imagens de satélite L8 e S2

Nas áreas de verdade de terreno, utilizaram-se os valores extraídos dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para comparação com os valores extraídos das imagens de satélite S2 e L8, com o objetivo de se identificar o limiar dimensional a partir do qual as imagens de cada sensor de satélite podem ser utilizadas



para a caracterização espectral das lagoas. Optou-se por aplicar diferentes métodos, a fim de identificar as mudanças de reflectância introduzidas pela heterogeneidade dos pixéis das imagens de muito alta resolução e avaliar os impactos desses dados, no valor dos pixéis das imagens de satélite e consequentes valores de correlação de *Pearson*.

Nas áreas de teste regional, optou-se por utilizar um único método para analisar as variações intra- anuais das dinâmicas espectrais dos lagos e lagoas. Adotou-se o valor de um único pixel, mais central e com maior área inserido dentro do lago ou lagoa, como sendo representativo. Este método surgiu no sentido de tentar reduzir ao máximo a contaminação espectral introduzida por outras coberturas do solo, na alteração do valor de reflectância dos pixéis das diferentes bandas.

#### 4.5.1. DADOS DE VERDADE DE TERRENO (CÂMARA MULTIESPECTRAL *SEQUOIA*)

A extração dos valores de reflectância dos pixéis das quatro bandas da *Sequoia*, realizou-se através de dois métodos que diferem na forma de amostragem dos pixéis. No método 1 (M1 S) calculou-se o valor médio dos pixéis dentro de áreas de referência das lagoas, enquanto no método 2 (M2 S) se calculou o valor médio dos pixéis presentes no interior de um círculo central com uma área igual a 20 % da área de referência das lagoas (fig. 50 e 51). Cada um dos métodos foi testado para áreas de referência de modo a avaliar o efeito das sombras na assinatura espectral das lagoas: LC – considera as áreas das lagoas completas, SS – considera apenas as áreas sem sombra e CS – considera apenas as áreas com sombra. O valor médio dos pixéis foi obtido através de estatística zonal.

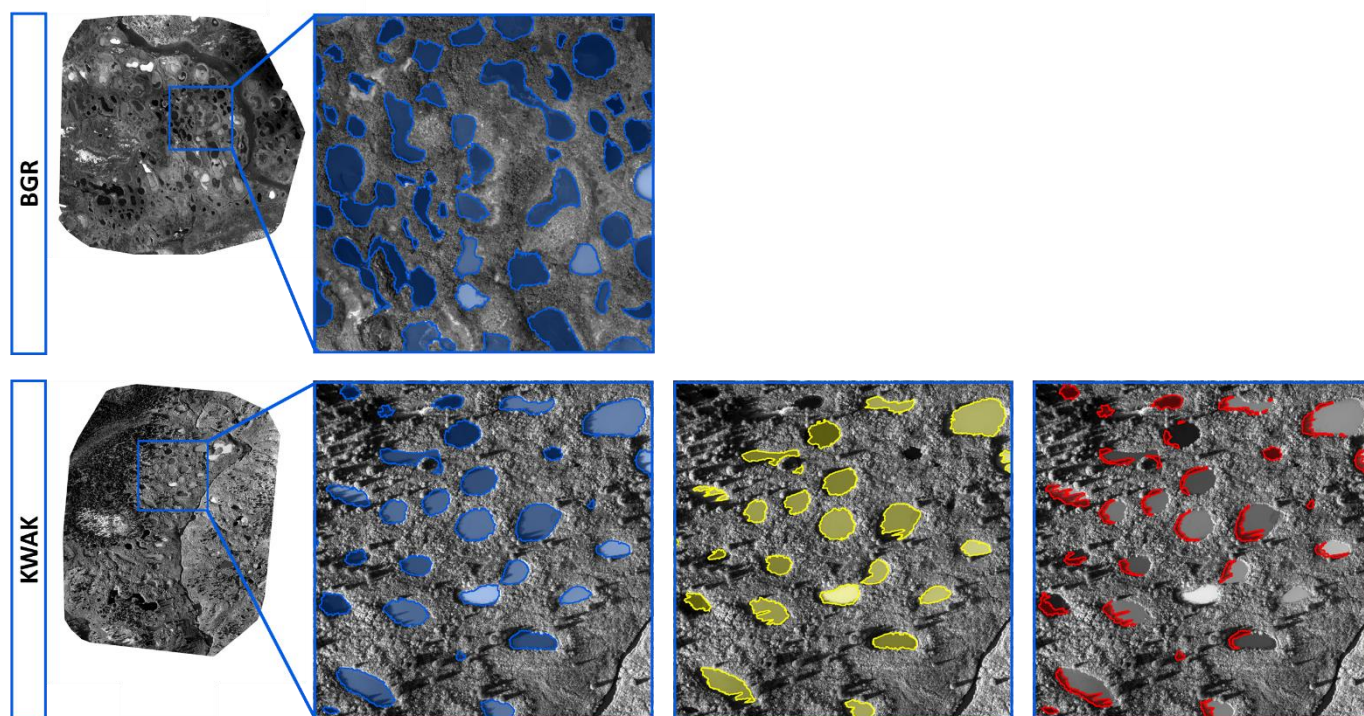


Figura 50: M1 S – Estatística zonal para obtenção do valor médio considerando todos os pixéis presentes nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS)

A aplicação do M2 S permitiu a redução de alguma variabilidade e heterogeneidade espectral, reduzindo-se os valores de variância e desvio padrão em torno do valor médio dos pixels em cada área de referência. A implementação deste método, nas áreas SS, permitiu a obtenção do comportamento espectral relativo às massas de água de forma precisa, minimizando-se a influência de vegetação aquática e limítrofe, bem como das sombras.

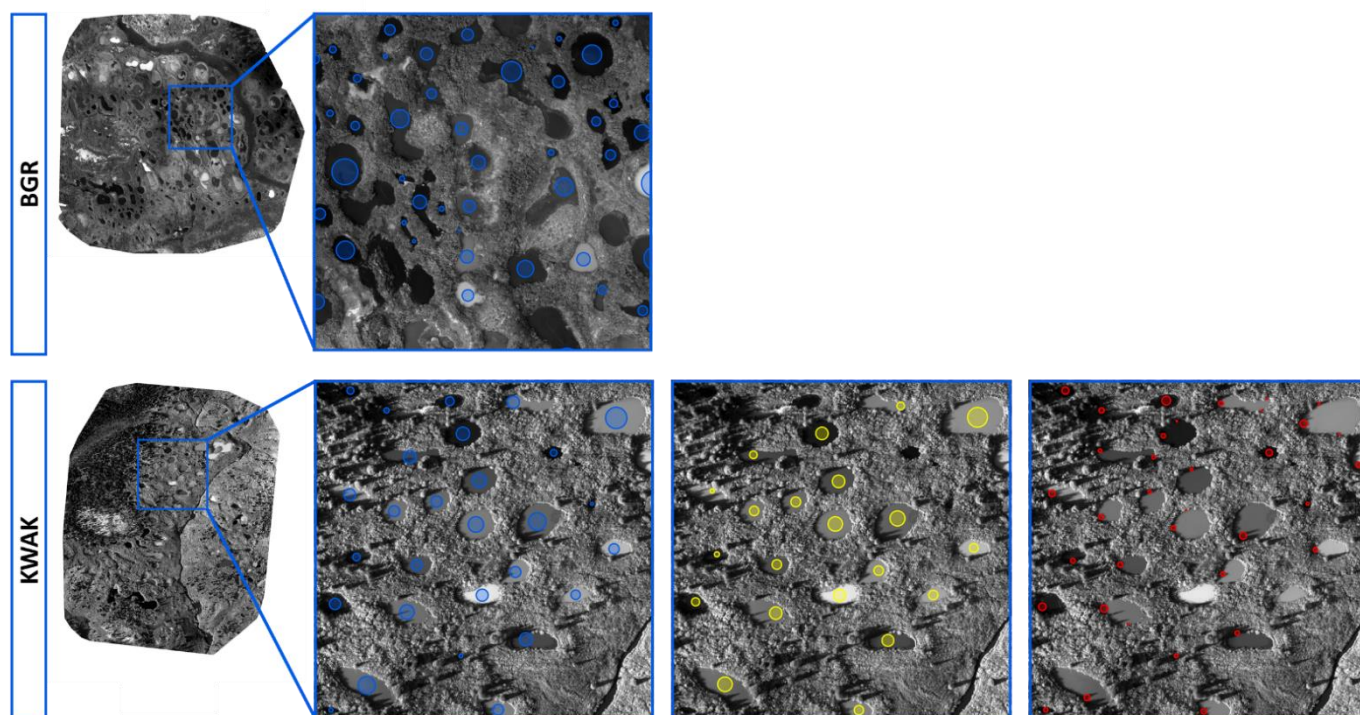


Figura 51: M2 S – Estatística zonal para obtenção do valor médio considerando todos os pixels presentes num círculo central com 20% da área, nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS)

A aplicação de ambos os métodos nas LC, permitiu a consideração das sombras na alteração do valor médio dos pixels das bandas, no caso de KWAK. Nas LC do M1 S, contemplou-se toda a área das sombras, enquanto no M2 S, contemplou-se apenas uma parte da área das sombras. Assim, localizaram-se os círculos de forma a que os pixels contemplassem partes de áreas com sombra e partes de áreas sem sombra, reduzindo-se apenas alguma variabilidade e heterogeneidade espectral dos pixels envolvidos, comparativamente à estatística zonal realizada a toda a área das LC no M1 S.

#### 4.5.2. DADOS DE SATÉLITE (*LANDSAT 8 E SENTINEL-2*)

A extração dos valores de reflectância dos pixels das imagens de satélite L8 e S2, ocorreu igualmente através de dois métodos (M1 L8/S2 e M2 L8/S2). Do mesmo modo que para os dados de verdade de terreno, obtiveram-se como áreas de referência, os valores para as lagoas completas, áreas sem sombra das lagoas e áreas com sombra das lagoas. Contudo, no caso dos dados de satélite, M1 e M2 diferem porque no primeiro se consideraram todos os pixels intersectados por cada uma das áreas de referência, calculando-se a sua



média, ao passo que no segundo, se usa apenas o valor do pixel com maior área intersectada nas áreas de referência (fig. 52 e 53).

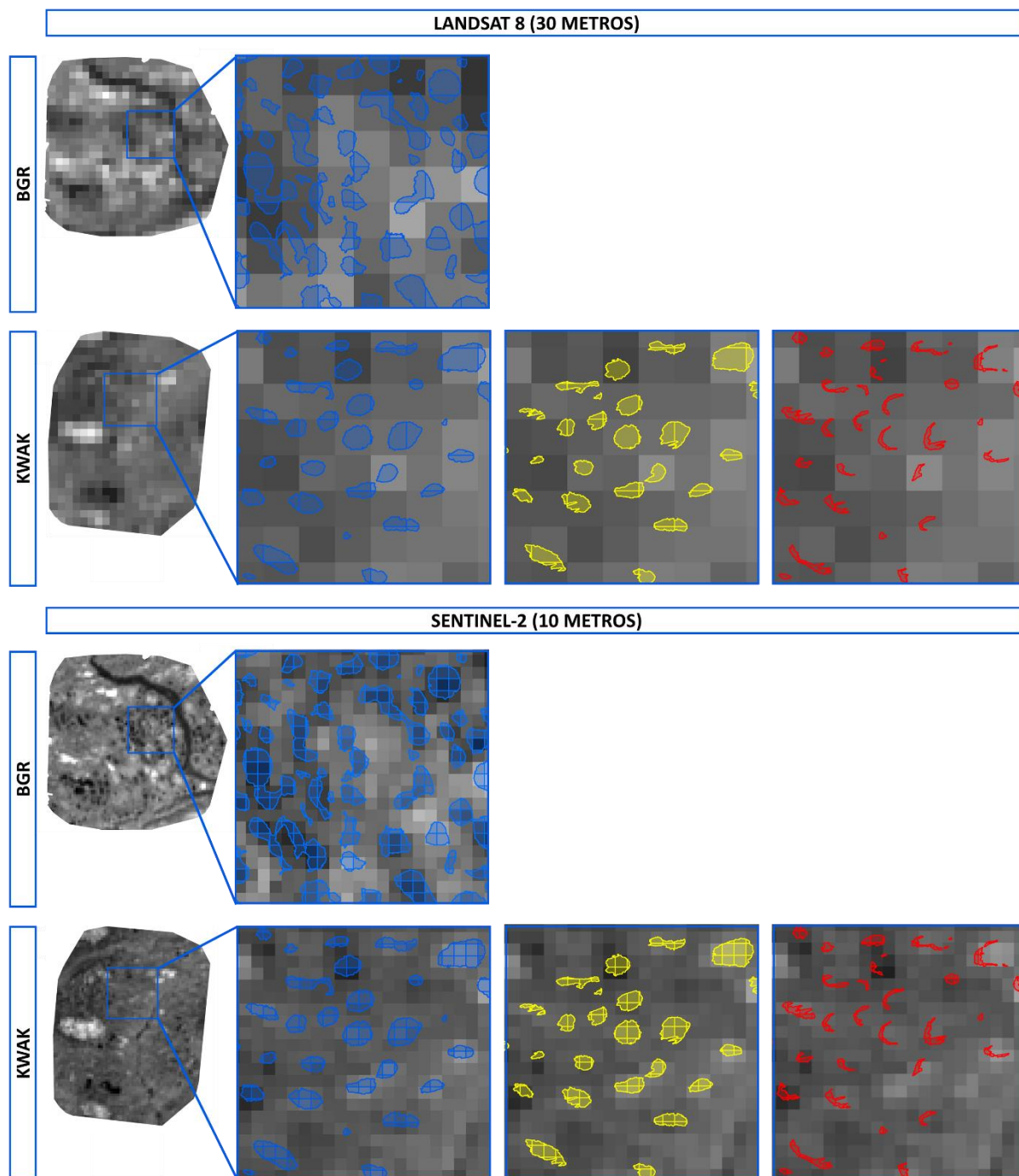


Figura 52: M1 L8/S2 – Estatística zonal para obtenção do valor médio de todos os pixels intersectados nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS)

A implementação do M1 L8/S2 contemplou, naturalmente, a influência de outras coberturas do solo na alteração dos valores de reflectância dos pixels que não inclusos, na sua totalidade nas áreas de referência. Quanto maior a dimensão do pixel e menor a dimensão da área da lagoa abrangida pelo mesmo, menor será a influência do comportamento espectral da lagoa nos valores de reflectância do pixel, uma vez que esses pixels receberão uma maior influência da área limítrofe. Nestas situações, a variabilidade do comportamento

espectral da área fora da lagoa ao longo do ano, irá condicionar a reflectância e consequentemente criar ruído nas características espectrais das lagoas.

Com o objetivo de minimizar o erro inerente à resolução espacial dos satélites S2 e L8, o método 2 de extração dos valores de reflectância, procura caracterizar as lagoas com a menor influência possível das superfícies envolventes (fig. 53). Em algumas situações, verificou-se a existência de mais do que um pixel completo (com maior área) dentro da mesma lagoa, pelo que nesses casos, adotou-se o valor de reflectância do pixel mais central, procedendo-se à eliminação dos restantes.

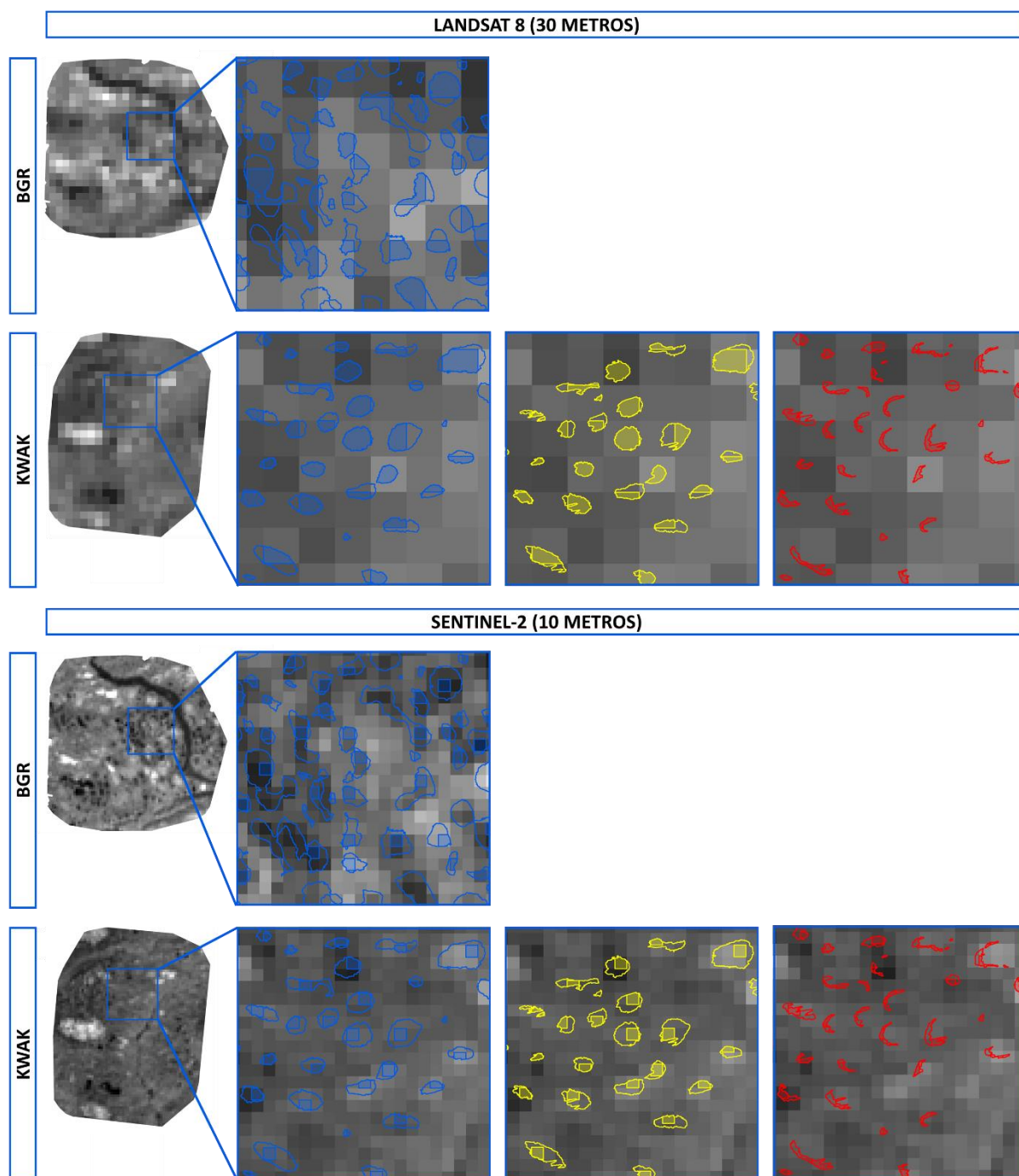


Figura 53: M2 L8/S2 – Valor de um único pixel com maior área e mais central presente nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS)

#### 4.5.3. CUIDADOS E CONSTRANGIMENTOS NA COMPARAÇÃO DAS BANDAS DOS SENSORES *SEQUOIA*, *LANDSAT 8* E *SENTINEL-2*

A reflectância obtida a partir dos diferentes métodos e sensores foi realizada usando correlações de *Pearson*, comparando os dados de verdade de terreno (M1 S e M2 S) com os dados das imagens de satélite L8 e S2 (M1 L8/S2 e M2 L8/S2).

Ao nível da coerência temporal, procurou-se utilizar imagens de satélite S2 e L8 de datas o mais próximas possível ao dia do levantamento dos dados de verdade de terreno (ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*), com o objetivo de minimizar as diferenças espectrais associadas a mudanças na superfície. Uma vez que se obtiveram os dados de verdade de terreno no dia 31 de agosto de 2017 às 16 horas para BGR e 1 de setembro de 2017 às 17 horas para KWAK, utilizaram-se imagens L8 relativas à situação de 25 de agosto de 2017 às 10 horas e 11 minutos e imagens S2 relativas à situação de 23 de agosto de 2017 às 10 horas e 30 minutos. Devido a fatores relacionados com a logística disponível para a realização do trabalho de campo, não foi possível realizar os voos considerando a mesma hora da captura das imagens de satélite, isto é, no período matinal próximo das 10 horas, ao invés de ao final do dia. É, por outro lado, recomendável a realização dos voos ao meio dia solar, por forma a evitar influência das sombras projetadas por elementos presentes na superfície terrestre e minimizar impactos inerentes a superfícies com reflectância lambertiana, em que a energia se dispersa em muitas direções, como por exemplo os lagos e lagoas (Assmann et al., 2018).

Ao nível da coerência espacial, procurou-se extrair os dados de reflectância em áreas bem delimitadas relativas às lagoas e aos lagos, considerando a sua delineação e recorrendo-se às imagens de muito alta resolução (ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para as áreas de verdade de terreno e imagens de satélite WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional). Atribuiu-se uma chave primária inequívoca aos registos de determinados campos das tabelas da base de dados destinados a esse efeito, a todas as áreas delimitadas dos(as) e nos(as) lagos e lagoas, tornando-as áreas unicamente identificáveis com base nesses campos.

Através de geocodificação, procurou-se estabelecer a ligação entre os dados extraídos dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* e os dados extraídos das imagens de satélite L8 e S2 para cada área. As áreas abrangidas revelaram-se diferentes em ambas as áreas de verdade de terreno (BGR e KWAK), uma vez que em KWAK as áreas delimitadas, não se referiram, simplesmente à área total das lagoas, mas também às áreas das lagoas com sombras. Assim, na área de verdade de terreno relativa a KWAK, a relação na base de dados, foi de 1:n, ao invés de 1:1, uma vez que uma lagoa pode apresentar várias áreas com sombra e várias áreas sem sombra no seu interior.

Nas áreas de teste regional, a relação na base de dados entre os registos e tabelas, foi de 1:1, uma vez que as únicas áreas delimitadas se referiram a lagos e lagoas individualmente identificados(as), sem unidades espaciais delimitadas no seu interior.

Por fim, ao nível da coerência espectral, consideraram-se as bandas da câmara multiespectral *Sequoia* com comprimento de onda central mais próximo das respetivas bandas L8 e S2 (tabela 7). A este nível

destacam-se sobretudo diferenças na resposta espectral total por parte de todos os sensores utilizados (*Sequoia*, L8 e S2). As diferenças são particularmente grandes considerando a comparação com a banda infravermelho próximo do L8, sendo esta uma grande limitação dos materiais utilizados nesta dissertação. Para além deste fator, nesta fase, constatou-se que o satélite L8 não apresenta bandas com o comprimento de onda central relativo ao limite do vermelho. O S2, por outro lado, destaca-se pela oferta de três bandas vermelho próximo com resolução de 20 metros, permitindo estudos de monitorização terrestre relativos ao estado dos ecossistemas e biomas, com especial destaque para a agricultura, vegetação e florestas, sem precedentes a nível global (ESA (B), 2018).

Tabela 7: Correspondência das bandas da câmara multiespectral *Sequoia* com as bandas *Landsat 8* (L8) e *Sentinel-2* (S2)

| <b>Bandas da <i>Sequoia</i></b>         | <b>Bandas <i>Landsat 8</i> correspondentes</b>    | <b>Bandas <i>Sentinel-2</i> correspondentes</b>    |
|---|---|--|
| Verde<br>(530 - 570 nm)                 | Banda 3 – Verde<br>(533 – 590 nm)                 | Banda 3 – Verde<br>(542.5 – 577.5 nm)              |
| Vermelho<br>(640 - 680 nm)              | Banda 4 – Vermelho<br>(636 – 673 nm)              | Banda 4 – Vermelho<br>(650 – 680 nm)               |
| Limite do vermelho<br>(730 - 740 nm)    | -   | Banda 6 – Limite do vermelho<br>(732.5 – 747.5 nm) |
| Infravermelho próximo<br>(770 - 810 nm) | Banda 5 – Infravermelho próximo<br>(851 – 879 nm) | Banda 7 – Limite do vermelho<br>(773 – 793 nm)     |

De notar que no satélite S2 a banda com comprimento de onda mais central da câmara multiespectral *Sequoia* relativa ao infravermelho próximo, corresponde, na verdade, à banda limite do vermelho (banda 7), ao invés da banda infravermelho próximo (Banda 8 - 767 – 908 nm). Ao contrário da banda infravermelho próximo do S2, que apresenta uma resolução de 10 metros, ambas as suas bandas limite do vermelho têm uma resolução de 20 metros, pelo que recorrendo ao novo *plugin* do programa SNAP da ESA, designado *Super-resolution*, realizou-se o *pansharpening* dessas bandas para resolução de 10 metros (Brodu, 2017). Ao longo deste trabalho, essas bandas são designadas de “Super limite do vermelho” e “Super infravermelho próximo”. Esta comparação foi realizada apenas para a área de verdade de terreno de KWAK.

Regra geral, a aplicação de *pansharpening* em imagens de satélite, consiste na capacidade de aplicar um método de fusão capaz de combinar, uma imagem multiespectral de menor resolução, com imagens pancromáticas em escalas de cinza de maior resolução, criando-se uma nova imagem de uma determinada banda, com melhor resolução espacial e preservando-se a sua qualidade espectral (Krishnan & Rakshmi, 2015). No entanto, o satélite S2 não apresenta bandas pancromáticas de alta resolução, pelo que a aplicação de métodos convencionais de *pansharpening* não é possível (Brodu, 2017).

Segundo Brodu (2017) o método desenvolvido, extrai a informação independente das bandas de melhor resolução, sendo capaz de decodificar os detalhes da imagem, servindo de referência para as bandas de menor resolução, melhorando o seu detalhe espacial e preservando os seus valores de reflectância.

Aquando da aplicação do algoritmo *Super-resolution*, deixaram-se os seus parâmetros de configuração por defeito (tabela 8).

De constatar que esta dissertação, até à data de aplicação do algoritmo, constituía um dos primeiros testes realizados à qualidade deste algoritmo, sendo que a utilização precoce deste *plugin* pode ter carecido de alguma informação complementar importante relativa à configuração dos seus parâmetros (não existente). O processamento do algoritmo demorou cerca de dois dias para uma única coleção de bandas do S2.

Tabela 8: Parâmetros de configuração do plugin *Super-resolution* do programa SNAP da Agência Espacial Europeia (ESA)

| Parâmetros de configuração             |  |
|--|--|
| <i>Maximum number of interactions:</i> | 30   |
| <i>Number of threads:</i>              | -1   |
| <i>Block size hint:</i>                | 30   |
| <i>Fix the number of blocks (x):</i>   | 0  |
| <i>Fix the number of blocks (y):</i>   | 0  |
| <i>Use inner iterations:</i>           | <i>Not checked</i>                         |
| <i>Iterative solver tolerance:</i>     | 1E-4                                       |
| <i>All data bands:</i>                 | B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B8A,B9,B10,B11,B12 |





## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

Este capítulo encontra-se organizado em duas componentes, sendo a primeira direcionada à identificação do limiar mínimo dimensional das lagoas por parte das imagens L8 e S2, partindo das áreas de verdade de terreno; e a segunda direcionada à monitorização das características espectrais intra-anuais dos lagos e lagoas, presentes nas áreas de teste regional, procedendo-se à utilização das imagens do melhor satélite (L8 ou S2).

Na primeira componente procura-se perceber a distribuição, características morfológicas e espectrais das lagoas envolvidas nas áreas de verdade de terreno. Procede-se à ponderação dos melhores métodos para a extração da reflectância, apurando-se consequências inerentes às diferentes resoluções espaciais dos sensores (*Sequoia*, L8 e S2), bem como efeitos relacionados com a influência das sombras e com fatores externos aos dados trabalhados. A identificação do melhor satélite realiza-se confrontando os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (dados de verdade de terreno) com as imagens multiespectrais do L8 e S2, através da realização de correlações de *Pearson* (R) pela área das lagoas, nomeadamente excluindo-se a de área mínima sucessivamente, e calculando-se um novo coeficiente de correlação (R) com base nas restantes. O melhor satélite é o que apresenta o limiar mínimo dimensional mais baixo, garantindo correlações fortes positivas com os dados de verdade de terreno, sendo capaz de caracterizar as lagoas termocársicas mais pequenas. Utiliza-se as imagens do melhor satélite, como referência, para a realização da análise das características espectrais intra-anuais dos lagos e lagoas, presentes nas áreas de teste regional.

Na segunda componente, partindo das áreas de teste regional, procura-se perceber a distribuição dos lagos e lagoas ao longo do vale de cada área de estudo. Realiza-se a caracterização dos lagos e lagoas e uma comparação morfológica com os dados de verdade de terreno, tentando-se apurar a representatividade dessa amostra face à população de lagos e lagoas existente nas áreas de teste regional, uma vez que a sua morfologia, a par da sua dimensão, condicionará a sua capacidade em conter os pixéis das imagens de satélite. Confrontam-se os limites extraídos dos dados de verdade de terreno com os limites extraídos dos dados de satélite de muito alta resolução WW 2 e WV 4, constatando-se diferenças entre esses limites e erros associados aos diferentes processos de ortorretificação, georreferenciação e classificação das imagens. Realiza-se uma comparação com as bases de dados mundiais da GWLD (*Global Lakes and Wetlands Database*) e da GSWE (*Global Surface Water Explorer*), indo ao encontro da natureza do problema, no sentido de apurar insuficiências ao nível dessas bases de dados, no que toca à identificação, caracterização e monitorização de lagoas termocársicas. O passo final consiste na análise das dinâmicas espectrais intra-anuais dos lagos e lagoas.

## 5.1. IDENTIFICAÇÃO DO LIMIAR MÍNIMO DIMENSIONAL DAS LAGOAS (BGR E KWAK)

### 5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DAS LAGOAS

Assumiram-se um conjunto de lagoas termocársicas abrangidas pelos voos realizados pelo VANT, como os dados de verdade de terreno, de base para o desenvolvimento desta dissertação, sendo consideradas amostras (fig. 54). No total extraíram-se 308 lagoas para BGR e 109 lagoas para KWAK.

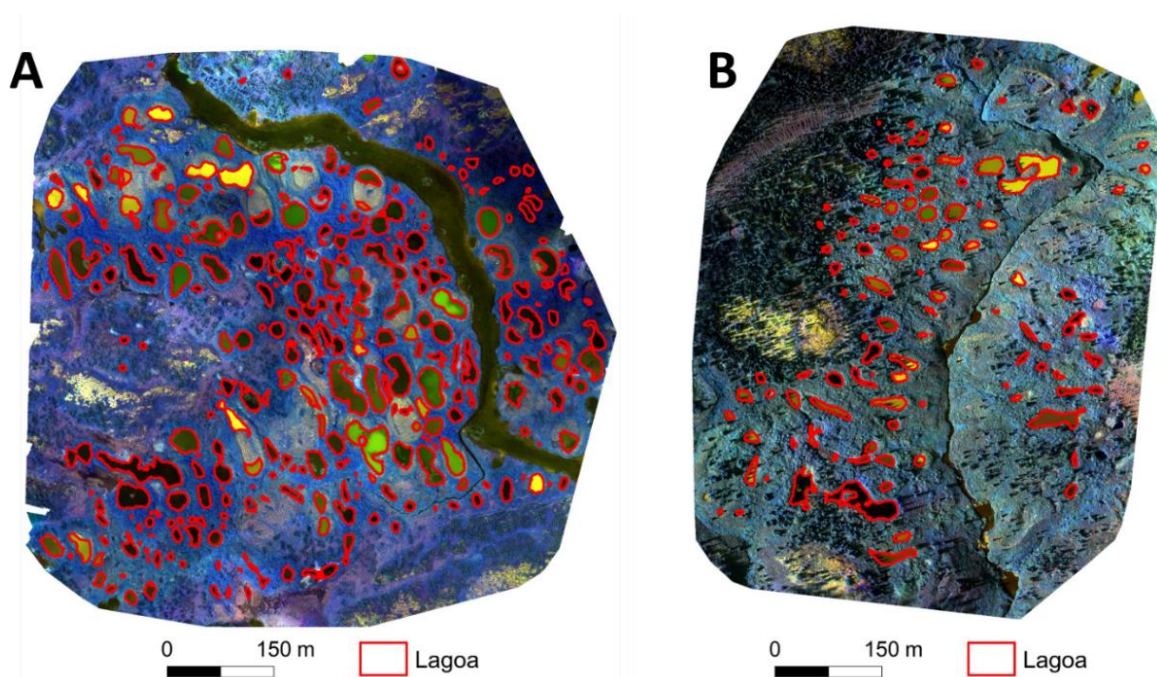


Figura 54: Lagoas termocársicas em BGR (A) e em KWAK (B) num compósito de ortomosaicos de muito alta resolução da câmara multiespectral *Sequoia* (Banda Vermelho: vermelho; Banda Verde: verde; Banda Azul: infravermelho próximo)

#### A. MORFOLOGIA DAS LAGOAS

Os valores mínimo e máximo de área das lagoas revelaram-se próximos em ambas as áreas de estudo, sendo de cerca de 2 m<sup>2</sup> o valor mínimo e 2367 m<sup>2</sup> o valor máximo. O total de área abrangida com lagoas termocársicas é superior em BGR, perfazendo 80 992 m<sup>2</sup>, fruto da maior densidade de lagoas, mas também da maior área levantada pelo VANT (576 987 m<sup>2</sup>), comparativamente a KWAK, onde a área com lagoas perfaz 23 188 m<sup>2</sup>, numa área total de voo de 468 991 m<sup>2</sup>. BGR apresenta uma densidade de cerca de 500 lagoas/km<sup>2</sup> e KWAK apresenta uma densidade de cerca de 200 lagoas/km<sup>2</sup>.

De destacar que os valores relativos às medidas de forma e assimetria da distribuição dos dados relativos à área das lagoas são muito semelhantes em BGR e em KWAK, nomeadamente considerando a área média (262,96 m<sup>2</sup> e 212,74 m<sup>2</sup>, respetivamente), bem como mediana (125,90 m<sup>2</sup> e 136,64 m<sup>2</sup>, respetivamente) e desvio padrão (349,25 m<sup>2</sup> e 309,17 m<sup>2</sup>, respetivamente) (tabela 9).

Tabela 9: Medidas estatísticas da área das lagoas em BGR e em KWAK

|                  | BGR                     | KWAK                    |
|------------------|-------------------------|-------------------------|
| Número de lagoas | 308                     | 109                     |
| Área mínima      | 2,95 m <sup>2</sup>     | 2,22 m <sup>2</sup>     |
| Área máxima      | 2367,81 m <sup>2</sup>  | 2190,15 m <sup>2</sup>  |
| Soma             | 80992,09 m <sup>2</sup> | 23188,43 m <sup>2</sup> |
| Média            | 262,96 m <sup>2</sup>   | 212,74 m <sup>2</sup>   |
| Mediana          | 125,90 m <sup>2</sup>   | 136,64 m <sup>2</sup>   |
| Desvio padrão    | 349,25 m <sup>2</sup>   | 309,17 m <sup>2</sup>   |

BGR e KWAK, são áreas de estudo caracterizadas pelo predomínio das lagoas termocársicas de pequena dimensão (fig. 55), com mais de 50% delas inferiores a 150 m<sup>2</sup>, sendo que mais de 70% em BGR e 80% em KWAK, são inferiores a 300 m<sup>2</sup>.

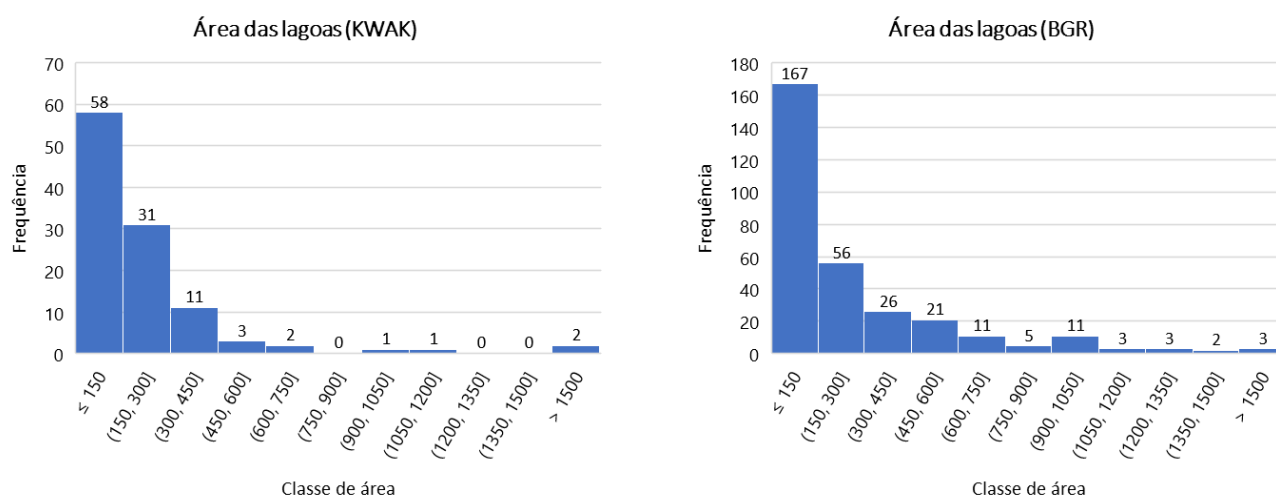


Figura 55: Distribuição por classes de área das lagoas de BGR e KWAK

Os lagos e lagoas associadas à progressiva fusão do permafrost podem apresentar uma enorme variedade de formas, fruto do tempo e do processo de degradação de *palsas* e *lithalsas* (Payette et al., 2004). Assim, procurou-se perceber a morfologia das lagoas envolvidas em ambas as áreas de estudo, através da interpretação de alguns índices e métricas de forma.

A assimetria de um determinado objeto, pode ser obtida comparando-o com um polígono regular, através do ajuste de uma elipse. Quanto maior o valor de assimetria, mais assimétrico será o objeto (Trimble, 2014). Ao analisar-se a distribuição do número de lagoas por classes de assimetria, verifica-se a não existência de uma distribuição normal em ambas as áreas de estudo. Em BGR parecem existir dois *clusters* de lagoas, havendo uma concentração predominante entre os valores de assimetria 0.32 e 0.80, o que representa polígonos de média a elevada assimetria. Em KWAK os dados estão desigualmente dispersos pelas classes, embora as quebras naturais do conjunto de dados evidenciem a existência de essencialmente quatro *clusters* de lagoas (fig. 56).

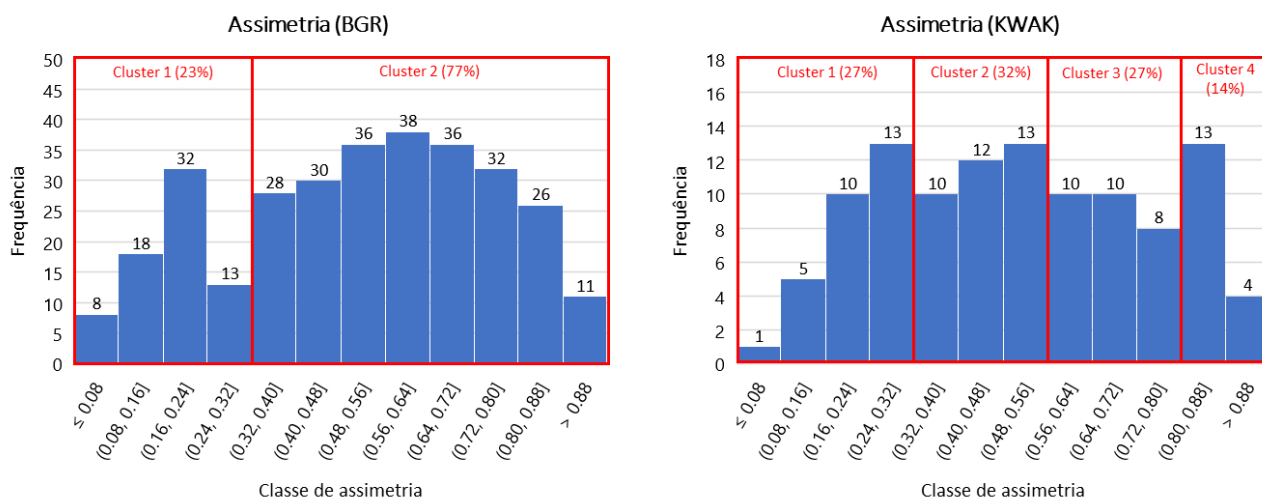


Figura 56: Distribuição por classes e clusters de assimetria das lagoas de BGR e KWAK (valores menores representam maior simetria e valores maiores representam assimetria)

Em BGR o primeiro *cluster*, que constitui 23% da amostra, é caracterizado por valores de assimetria baixos, o que indica lagoas simétricas, sendo essencialmente redondas (fig. 57 – A). Por outro lado, o segundo *cluster*, é caracterizado por uma enorme variedade de formas das lagoas, sendo que os valores indicam lagoas de assimetria moderada a assimetria alta, constituindo 77% da amostra.

Em KWAK há uma distribuição homogênea da assimetria pelos quatro *clusters*, sendo que o primeiro *cluster*, constituído pelas lagoas de assimetria mais baixa, representa 27%, o segundo *cluster* representa 32%, o terceiro *cluster* 27% e por fim, o quarto *cluster* constituído pelas lagoas de assimetria mais alta, representa 16% (fig. 57 – B). Evidencia-se a predominância de lagoas relativamente simétricas em KWAK.

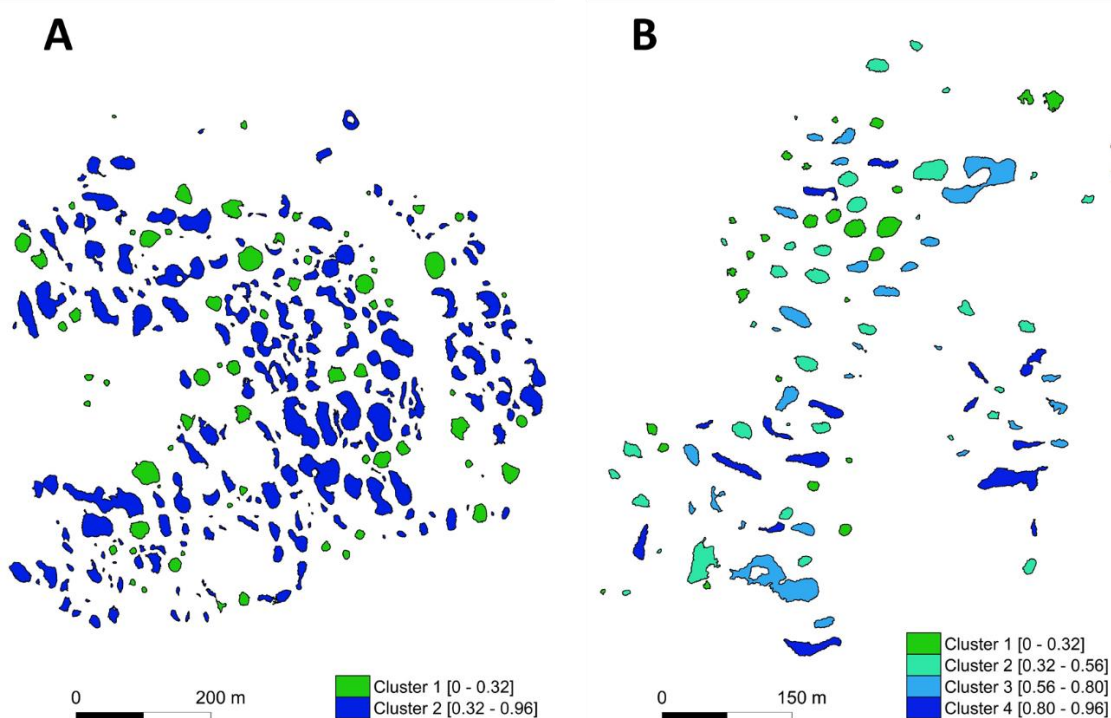


Figura 57: *Clusters* de assimetria das lagoas de BGR (A) e KWAK (B)

O índice de forma é utilizado para caracterizar a suavidade das fronteiras dos objetos. Quanto mais suave a fronteira de um determinado objeto, mais baixo o valor deste índice, sendo que quanto menos suave, mais elevado (Trimble, 2014) (fig. 58).

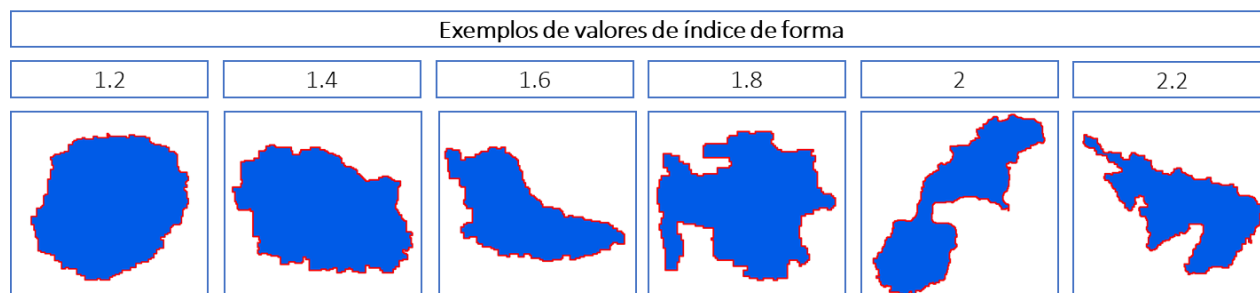


Figura 58: Exemplos de valores de índice de forma e implicações nas fronteiras dos objetos

A distribuição do número de lagoas por classes do índice de forma é semelhante em BGR e em KWAK, sendo que as fronteiras das lagoas tendem a ser mais suaves do que irregulares, apesar da vegetação limítrofe, em algumas situações, mergulhar para o interior da lagoa. A maioria das lagoas, possuem, portanto, uma morfologia suave e bem definida, bem como fronteiras bem delimitadas, principalmente em KWAK (fig. 59).

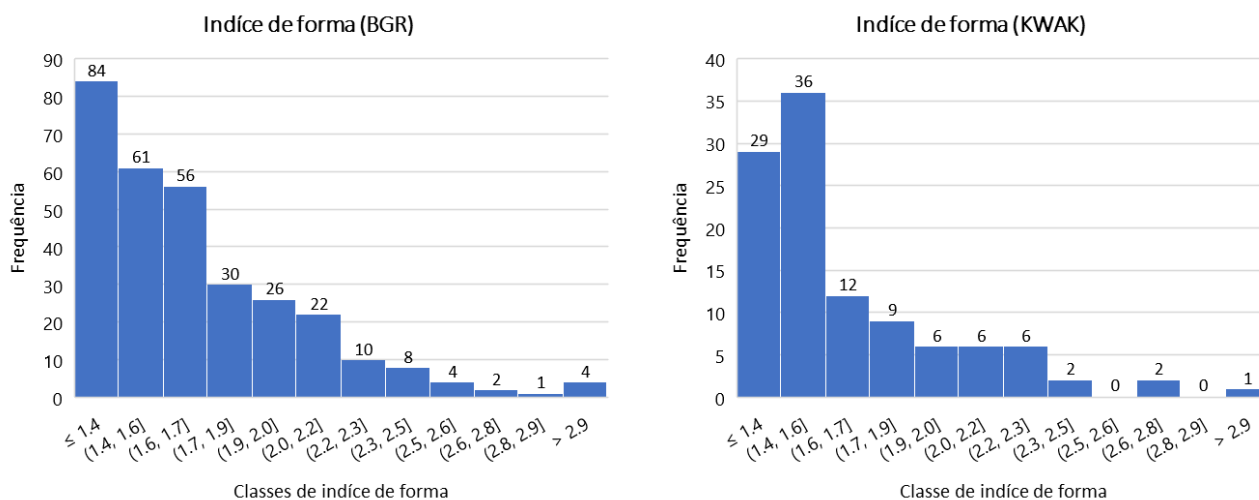


Figura 59: Distribuição por classes de índice de forma (menor – suave; maior – irregular) das lagoas de BGR e KWAK

O ajuste retangular descreve quão bem um determinado objeto se ajusta a um retângulo de tamanho e proporções semelhantes. O valor 0 descreve um objeto que não se ajusta a um retângulo e o valor 1 descreve um objeto que se ajusta completamente a um retângulo (Trimble, 2014).

Ao analisar-se a distribuição dos dados por classes de ajuste retangular, pode verificar-se uma distribuição relativamente idêntica em ambas as áreas de estudo, com a predominância de lagoas que possuem um ajuste retangular elevado (fig. 60). O ajuste retangular é superior a 0,80 (elevado) em 77% das lagoas de BGR e 91% das lagoas de KWAK.

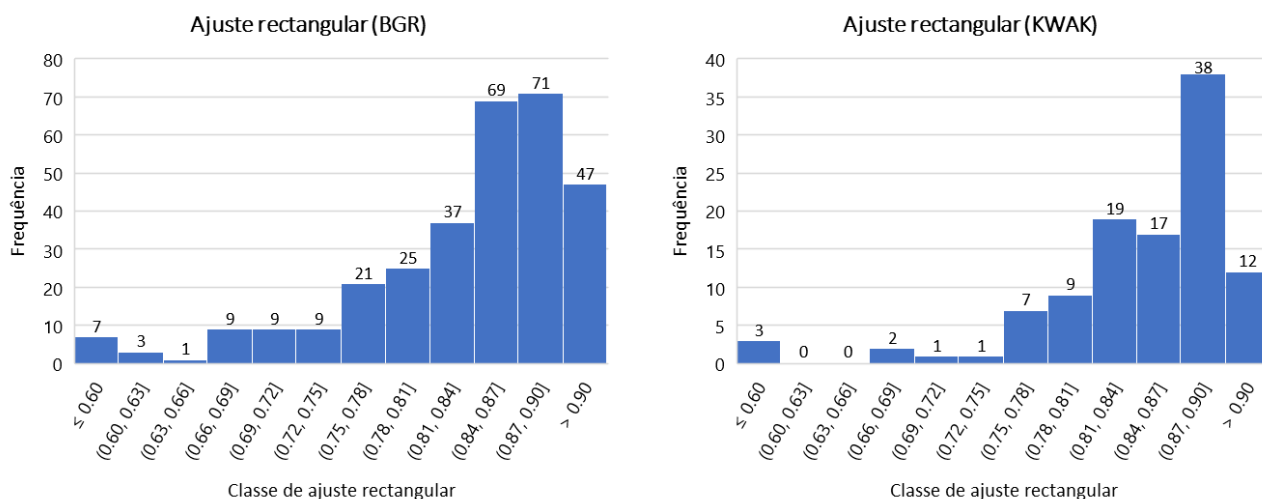


Figura 60: Distribuição por classes de ajuste retangular (0 – inexistente; 1 – completo) das lagoas de BGR e KWAK

O ajuste elíptico descreve quão bem um determinado objeto se ajusta a um elipsoide 2D de tamanho e proporções semelhantes. O valor 0 descreve um objeto que não se ajusta a um elipsoide e o valor 1 descreve um objeto que se ajusta na perfeição a um elipsoide (Trimble, 2014).

À semelhança do ajuste retangular, as lagoas de ambas as áreas de estudo possuem um ajuste elíptico médio a elevado, sendo, no entanto, não tão elevado quanto o ajuste retangular (fig. 61). Pode verificar-se que o ajuste elíptico é superior a 0,72 em 59% das lagoas de BGR e 64% das lagoas de KWAK. BGR evidencia uma menor percentagem de lagoas com ajuste elíptico e retangular elevados, o que representa a existência de uma maior complexidade de formas nessa área de estudo, comparativamente a KWAK. O ajuste retangular e elíptico elevado em KWAK indica a predominância de lagoas essencialmente circulares (Bouchard et al., 2014).

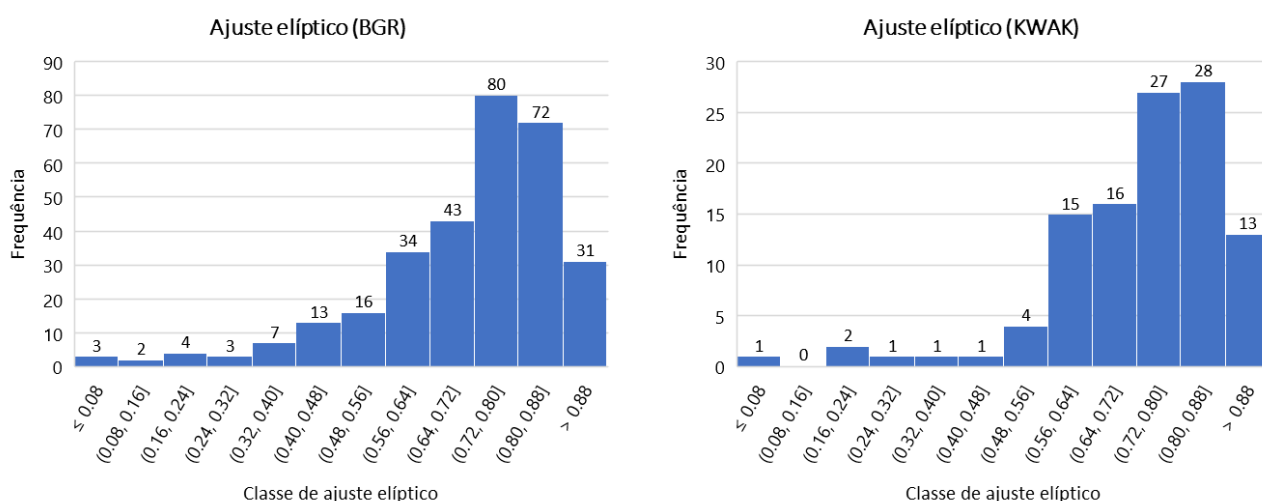


Figura 61: Distribuição por classes de ajuste elíptico (0 – inexistente; 1 – completo) das lagoas de BGR e KWAK

A métrica relativa à densidade dos objetos tem em consideração a distribuição dos pixéis no seu interior, sendo que quanto maior o valor de densidade mais a forma dos objetos se aproxima de um quadrado



e quanto menor, mais a forma dos objetos se aproxima de um filamento (objeto fino e alongado) (Trimble, 2014). Assim, verifica-se a predominância de lagoas com forma mais próxima a um quadrado, do que a um filamento, em ambas as áreas de estudo, sendo, este facto mais evidente em KWAK (fig. 62).

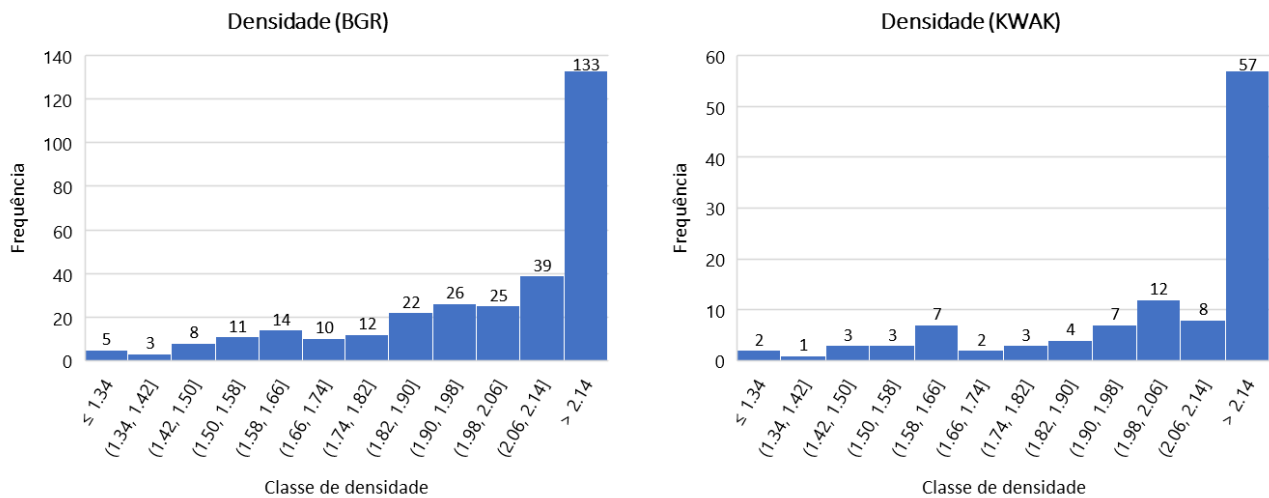


Figura 62: Distribuição por classes de densidade (menor – filamento; maior – quadrado) das lagoas de BGR e KWAK

A principal diferença, considerando métricas e índices de forma entre ambas as áreas de estudo, tem que ver com a direção principal das lagoas, não influenciando este fator, no entanto, a forma das mesmas (Trimble, 2014) (fig. 63). Em BGR, o eixo maior das lagoas encontra-se orientado para norte ( $144^\circ$  e  $180^\circ$ ), totalizando 42% das situações e em KWAK, o eixo maior das lagoas encontra-se orientado de este para oeste ( $72^\circ$  a  $108^\circ$ ), totalizando igualmente 42% das situações.

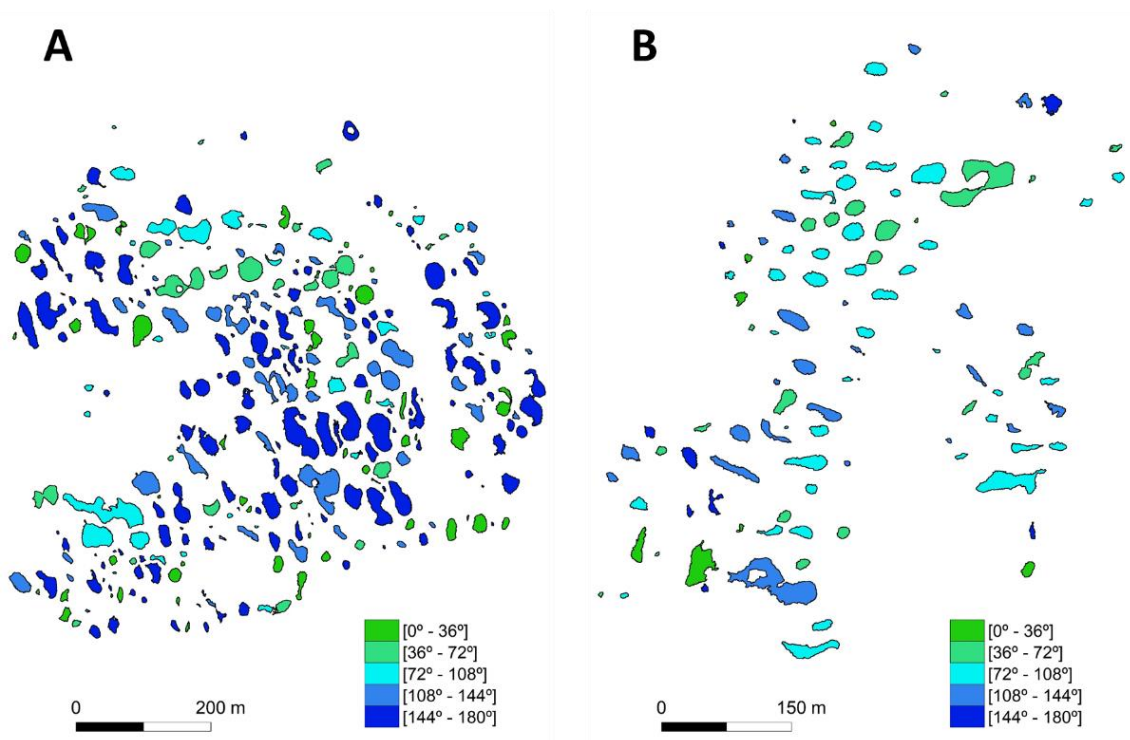


Figura 63: Direção principal das lagoas de BGR (A) e KWAK (B)

## B. CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS LAGOAS

As lagoas termocársicas de BGR e KWAK são bastante diversas do ponto de vista espectral. Assim, procurou-se perceber a distribuição dos valores médios de reflectância de todas as bandas por lagoa.

Em BGR destacam-se essencialmente dois setores mais dinâmicos e com valores médios de reflectância mais elevados (fig. 64). O setor 1 caracteriza-se pela presença de lagoas com valores médios mais elevados no espectro do visível e também no espectro do infravermelho próximo. Por outro lado, o setor 2, caracteriza-se, apenas, por lagoas com valores médios mais elevados no espectro do visível.

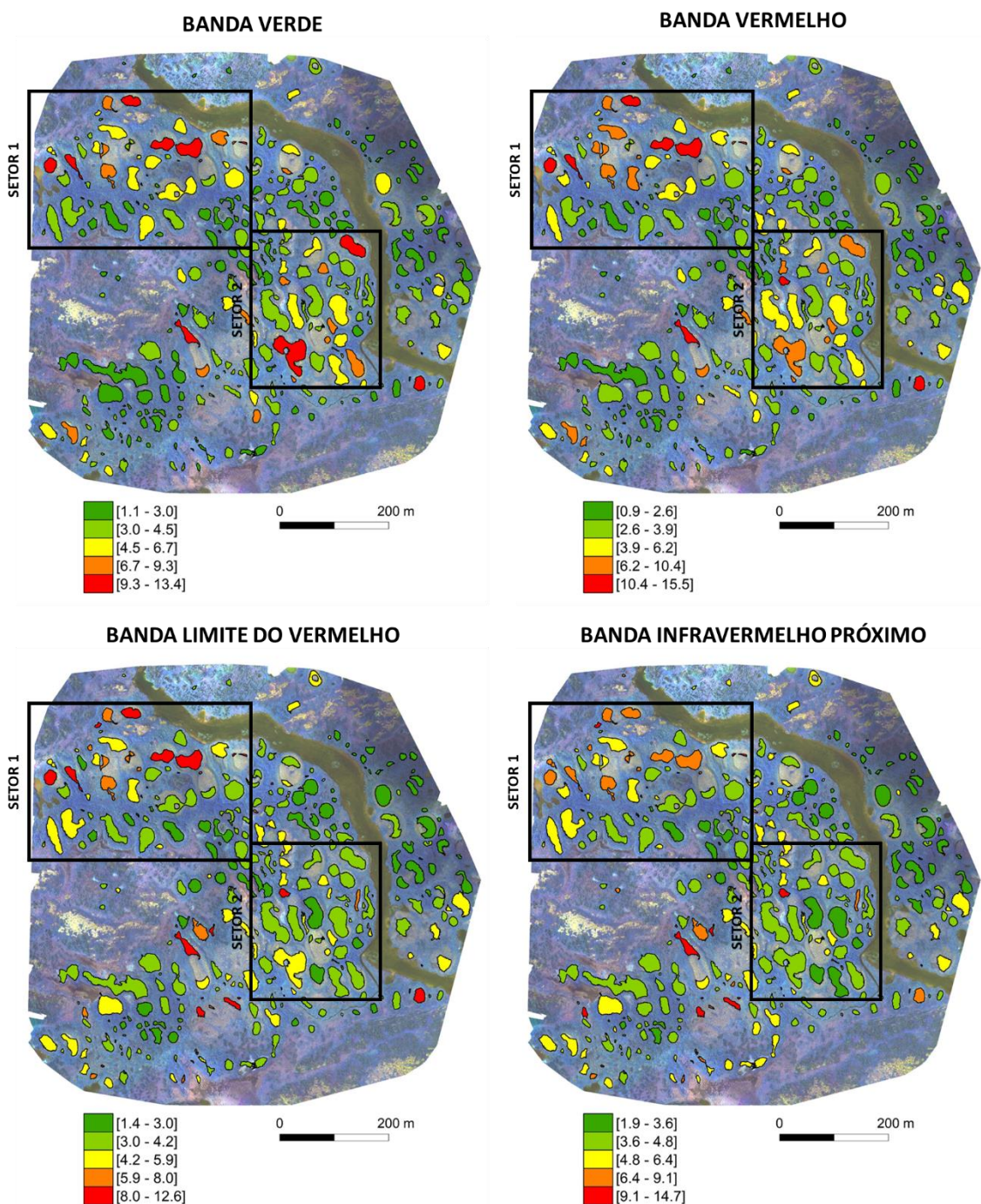


Figura 64: Reflectância nas bandas espectrais do verde, vermelho, limite do vermelho e infravermelho próximo nas lagoas de BGR; Método de extração da reflectância: M2 S; Método de classificação do conjunto de dados: Quebras naturais com 5 classes



Em KWAK não se destaca qualquer setor, uma vez que a maioria das lagoas apresenta a mesma dinâmica, nomeadamente valores médios de reflectância mais elevados nas bandas do espectro do visível e menos elevados no espectro do infravermelho próximo (fig. 64). Existem, no entanto, várias lagoas que registam valores médios de reflectância baixos em ambos os espectros. A variabilidade de valores médios de reflectância nas bandas limite do vermelho e infravermelho próximo é muito reduzida, havendo poucas pequenas lagoas onde os valores são elevados, referindo-se a lagoas eutrofizadas, poucos profundas e com a presença de vegetação aquática. Verifica-se que, tal como em BGR, nas lagoas de KWAK há uma tendência para uma melhor distribuição dos dados pelas classes nas bandas do espectro do visível, comparativamente às bandas do infravermelho próximo.

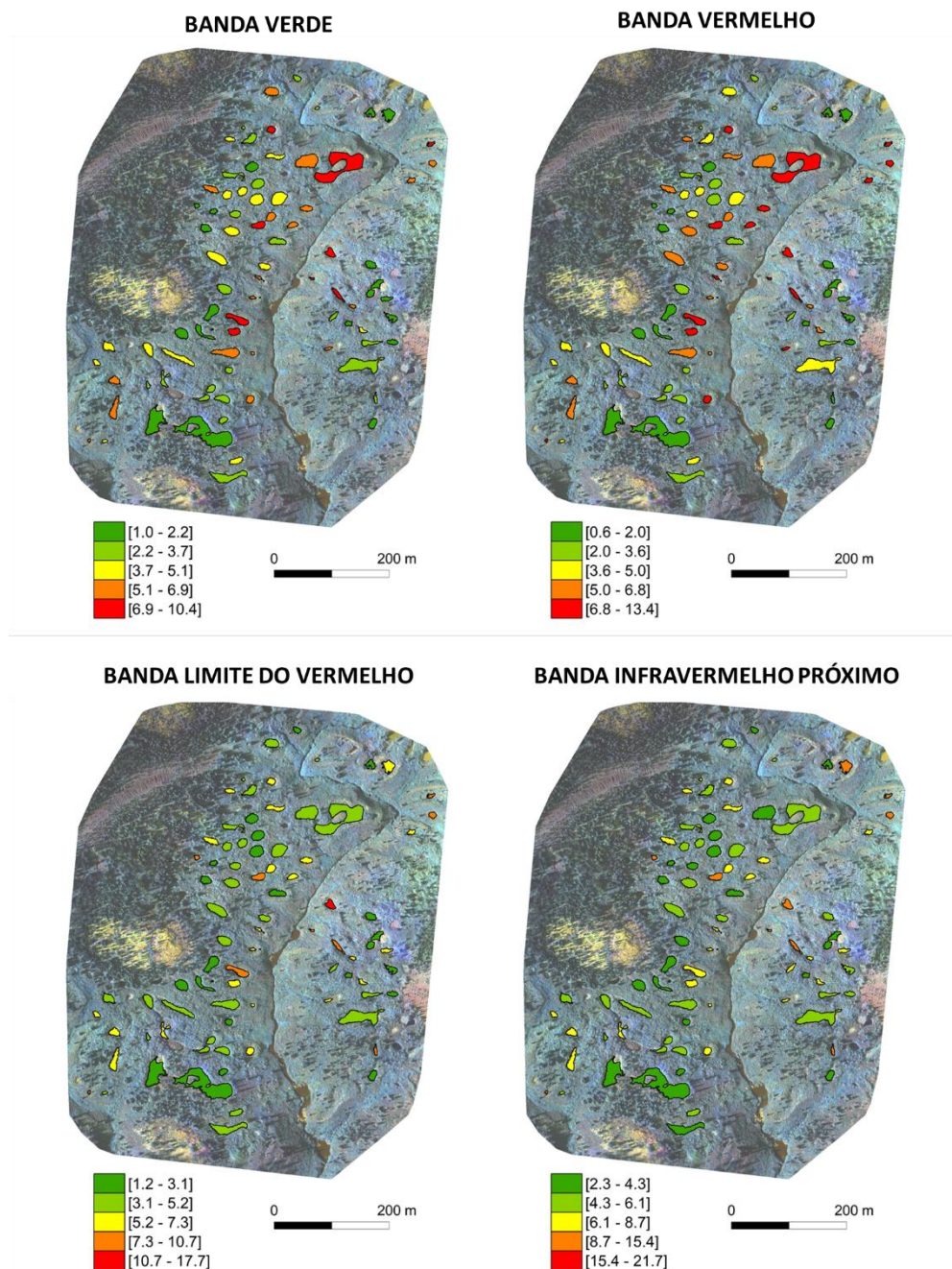


Figura 65: Reflectância nas bandas espectrais do verde, vermelho, limite do vermelho e infravermelho próximo nas lagoas de KWAK; Método de extração da reflectância: M2 S; Método de classificação do conjunto de dados: Quebras naturais com 5 classes

### 5.1.2. SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DA REFLECTÂNCIA (*SEQUOIA VERSUS LANDSAT 8 E SENTINEL-2*)

Realizaram-se correlações de *Pearson* confrontando os dois métodos de extração da reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (M1 S e M2 S) com os dois métodos de extração da reflectância das imagens de satélite L8 (M1 L8 e M2 L8) e S2 (M1 S2 e M2 S2) para BGR e para KWAK. Em BGR consideraram-se as áreas relativas às lagoas completas (LC) apenas, sendo que em KWAK, consideraram-se não só as áreas relativas às lagoas completas (LC), como também às áreas sem sombra (SS) e áreas com sombra (CS). Utilizaram-se os melhores métodos de extração da reflectância (correlação positiva mais forte) para a identificação do limiar mínimo dimensional, a partir do qual as imagens L8 e S2 podem ser utilizadas, para a caracterização espectral das lagoas.

Em BGR as correlações com os dados de verdade de terreno (M1 S e M2 S) são sempre mais fortes positivas com o S2 comparativamente ao L8, em todos os métodos (tabela 10). As correlações são sempre mais fortes nas bandas do espectro do visível, do que nas bandas do espectro do infravermelho próximo, sendo que no L8, as correlações com a banda infravermelho próximo são sempre não significativas (valores de  $p > 0,05$ ). Com o S2, as correlações com as bandas limite do vermelho e infravermelho próximo são sempre muito fracas positivas ou desprezáveis, situando-se abaixo de 0,3, exceto numa única situação. As correlações do S2 são fortes positivas com as bandas verde e vermelho, sendo que numa situação chega a ser muito forte positiva, enquanto com o L8 as correlações com essas bandas são moderadas positivas, sendo que numa situação desce a fraca positiva.

Tabela 10: Coeficientes de correlação de *Pearson* (R) relativos à comparação entre os dois métodos de extração dos valores de reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (dados de verdade de terreno) com os dois métodos de extração da reflectância das imagens de satélite L8 e S2 nas lagoas completas (LC) de BGR (**negrito e sublinhado** = correlações não significativas com valor de  $p > 0,05$ ; **negrito** = correlações não significativas com valor de  $p > 0,01$ )

|                                |                     | Bandas                | Landsat 8         |                   | Sentinel-2       |                  |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                |                     |                       | Método 1 (M1 L8)  | Método 2 (M2 L8)  | Método 1 (M1 S2) | Método 2 (M2 S2) |
| Método 1 <i>Sequoia</i> (M1 S) | Lagoa completa (LC) | Verde                 | 0,5               | 0,5               | 0,8              | 0,8              |
|                                |                     | Vermelho              | 0,5               | 0,5               | 0,8              | 0,9              |
|                                |                     | Limite do vermelho    | -                 | -                 | 0,2              | 0,2              |
|                                |                     | Infravermelho próximo | <b><u>0,0</u></b> | <b><u>0,1</u></b> | 0,2              | 0,3              |
| Método 2 <i>Sequoia</i> (M2 S) | Lagoa completa (LC) | Verde                 | 0,5               | 0,5               | 0,8              | 0,8              |
|                                |                     | Vermelho              | 0,5               | 0,4               | 0,8              | 0,8              |
|                                |                     | Limite do vermelho    | -                 | -                 | 0,2              | 0,2              |
|                                |                     | Infravermelho próximo | <b><u>0,1</u></b> | <b><u>0,1</u></b> | 0,3              | 0,2              |

Os coeficientes de correlação de *Pearson* mais elevados são os que resultam da combinação do método 1 da Sequoia (M1 S) com o método 2 do S2 (M2 S2) (fig. 66). Para o satélite L8 as correlações obtêm os mesmos valores entre todos os métodos, à exceção da combinação entre o M2 S com o M2 L8, em que os coeficientes são os mais baixos. Como tal, para este satélite, à semelhança do método selecionado para o S2, selecionou-se o método 1 da Sequoia (M1 S) com o método 2 do L8 (M2 L8) para BGR (fig. 67).

Analisando os gráficos de dispersão dos métodos selecionados para BGR (M1 S com M2 L8 e M2 S2), verifica-se um melhor ajuste das bandas verde e vermelho do S2 com os dados de verdade de terreno. Verifica-se também a perda de qualidade nas bandas limite do vermelho e infravermelho próximo deste satélite, com o aumento da dispersão desses dados. As linhas de tendência do L8, apresentam menor declive. Verifica-se uma acentuada dispersão dos dados na comparação das bandas infravermelho próximo, não esquecendo a inexistência de correlações significativas entre estas bandas.

Convém salientar que se consideraram todas as lagoas, independentemente da sua dimensão, facto que introduziu erros no processo de comparação, tendo em consideração a existência muito provável de misturas espectrais, sobretudo nas lagoas de menores dimensões.

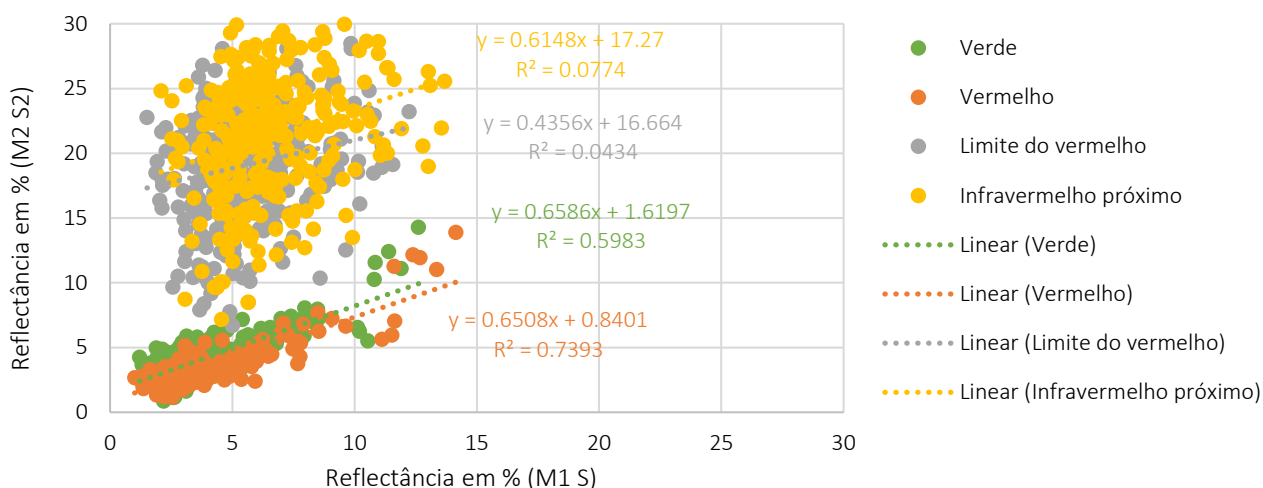


Figura 66: Melhores métodos de extração da reflectância em BGR para o S2 (M1 S versus M2 S2)

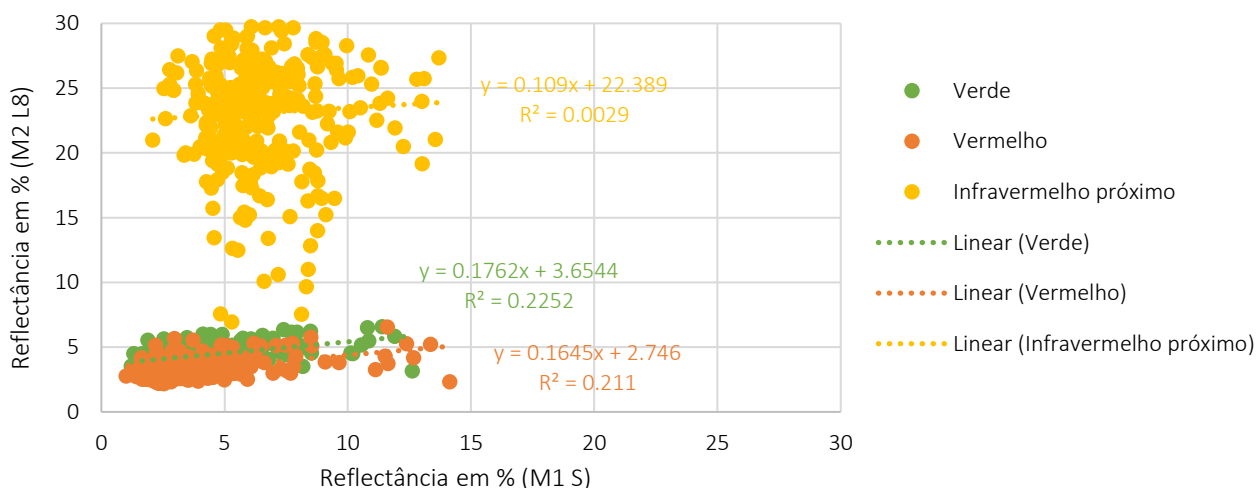


Figura 67: Melhores métodos de extração da reflectância em BGR para o L8 (M1 S versus M2 L8)

Na área de verdade de terreno relativa a KWAK tornou-se não só possível perceber as correlações com os dados de verdade de terreno e dados de satélite nas lagoas completas (LC), como também nas áreas com sombra (CS) e áreas sem sombra (SS), bem como analisar o desempenho do algoritmo de *pansharpening Super-resolution* aplicado sobre as bandas limite do vermelho do S2 (tabela 11).

Tabela 11: Coeficientes de correlação de *Pearson* (R) relativos à comparação entre os dois métodos de extração dos valores de reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (dados de verdade de terreno) com os dois métodos de extração da reflectância das imagens de satélite L8 e S2, nas áreas com sombra (S), áreas sem sombra (SS) e lagoas completas (LC) de KWAK (**negrito e sublinhado** = correlações não significativas com valor de  $p > 0,05$ ; **negrito** = correlações não significativas com valor de  $p > 0,01$ )

|                         |                     | Bandas                      | Landsat 8  |             | Sentinel-2  |             |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|                         |                     |                             | M1 L8      | M2 L8       | M1 S2       | M2 S2       |
| Método 1 Sequoia (M1 S) | Sombra (CS)         | Verde                       | 0,7        | 0,7         | 0,8         | 0,8         |
|                         |                     | Vermelho                    | 0,6        | 0,6         | 0,7         | 0,7         |
|                         |                     | Limite do vermelho          | -          | -           | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  |
|                         |                     | Super limite do vermelho    | -          | -           | <b>-0,1</b> | <b>-0,1</b> |
|                         |                     | Infravermelho próximo       | <b>0,0</b> | <b>-0,1</b> | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  |
|                         |                     | Super infravermelho próximo | -          | -           | <b>-0,1</b> | <b>-0,1</b> |
|                         | Sem sombra (SS)     | Verde                       | 0,6        | 0,6         | 0,9         | 0,9         |
|                         |                     | Vermelho                    | 0,5        | 0,5         | 0,9         | 0,8         |
|                         |                     | Limite do vermelho          | -          | -           | 0,3         | 0,3         |
|                         |                     | Super limite do vermelho    | -          | -           | 0,3         | <b>0,2</b>  |
|                         |                     | Infravermelho próximo       | <b>0,3</b> | <b>0,2</b>  | <b>0,2</b>  | <b>0,2</b>  |
|                         |                     | Super infravermelho próximo | -          | -           | <b>0,3</b>  | <b>0,2</b>  |
|                         | Lagoa completa (LC) | Verde                       | 0,6        | 0,6         | 0,9         | 0,8         |
|                         |                     | Vermelho                    | 0,5        | 0,4         | 0,9         | 0,8         |
|                         |                     | Limite do vermelho          | -          | -           | 0,3         | 0,3         |
|                         |                     | Super limite do vermelho    | -          | -           | <b>0,2</b>  | <b>0,2</b>  |
|                         |                     | Infravermelho próximo       | 0,3        | 0,3         | 0,3         | 0,3         |
|                         |                     | Super infravermelho próximo | -          | -           | <b>0,2</b>  | <b>0,2</b>  |
| Método 2 Sequoia (M2 S) | Sombra (CS)         | Verde                       | 0,7        | 0,6         | 0,8         | 0,7         |
|                         |                     | Vermelho                    | 0,5        | 0,5         | 0,6         | 0,6         |
|                         |                     | Limite do vermelho          | -          | -           | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  |
|                         |                     | Super limite do vermelho    | -          | -           | <b>-0,1</b> | <b>0,0</b>  |
|                         |                     | Infravermelho próximo       | <b>0,0</b> | <b>-0,1</b> | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  |
|                         |                     | Super infravermelho próximo | -          | -           | <b>0,0</b>  | <b>0,0</b>  |
|                         | Sem sombra (SS)     | Verde                       | 0,6        | 0,6         | 0,9         | 0,9         |
|                         |                     | Vermelho                    | 0,5        | 0,5         | 0,9         | 0,8         |
|                         |                     | Limite do vermelho          | -          | -           | 0,3         | 0,3         |
|                         |                     | Super limite do vermelho    | -          | -           | 0,3         | <b>0,2</b>  |
|                         |                     | Infravermelho próximo       | 0,3        | <b>0,2</b>  | <b>0,2</b>  | <b>0,2</b>  |
|                         |                     | Super infravermelho próximo | -          | -           | <b>0,3</b>  | <b>0,2</b>  |
|                         | Lagoa completa (LC) | Verde                       | 0,6        | 0,6         | 0,9         | 0,8         |
|                         |                     | Vermelho                    | 0,5        | 0,5         | 0,9         | 0,8         |
|                         |                     | Limite do vermelho          | -          | -           | 0,4         | 0,3         |
|                         |                     | Super limite do vermelho    | -          | -           | 0,3         | <b>0,2</b>  |
|                         |                     | Infravermelho próximo       | 0,4        | 0,3         | 0,3         | 0,3         |
|                         |                     | Super infravermelho próximo | -          | -           | 0,3         | <b>0,2</b>  |



À semelhança do sucedido em BGR, em KWAK as correlações com os dados de verdade de terreno tendem a ser sempre melhores com as bandas do S2 comparativamente às bandas do L8. Em KWAK verifica-se novamente que as correlações com ambos os satélites são tendencialmente melhores, confrontado as bandas do espectro do visível (banda verde e vermelho). Nestas, as correlações com as bandas L8 são fortes positivas apenas numa única situação (M1 S com M1 L8 nas áreas com sombra), ao contrário do que acontece com as bandas S2, em que são muito fortes ou fortes positivas em quase todas as situações.

A banda do limite do vermelho e a banda do infravermelho próximo têm correlações fracas positivas ou não significativas em ambos os sensores de satélite (L8 e S2), métodos e todas as áreas (CS, SS e LC). Os coeficientes de correlação da banda infravermelho próximo do L8 são ligeiramente mais elevados comparativamente aos coeficientes de correlação da mesma banda do S2.

Considerando as áreas abrangidas para a extração da reflectância (CS, SS e LC), as correlações tendem sempre a melhorar das áreas CS para as áreas SS e LC. Assim, as LC possuem os coeficientes de correlação mais elevados e as áreas CS, os coeficientes de correlação mais baixos. Ambos os métodos de extração dos dados de verdade de terreno e dos dados de satélite exibem valores de correlação muito próximos nas áreas SS e LC. Nas áreas CS as correlações são tendencialmente não significativas. Relembrando que a extração dos valores de reflectância nas LC ocorreu com a contemplação de toda (M1 S) ou alguma (M2 S) capacidade de alteração do valor médio dos pixels devido à influência das sombras, os resultados obtidos podem evidenciar a existência de misturas espectrais igualmente nos dados de satélite, devido a esse fator.

A aplicação do *pansharpening* nas bandas limite do vermelho do satélite S2, originalmente com resolução de 20 metros, não revela coeficientes de correlação melhores com os dados de verdade de terreno. As correlações são sempre fracas positivas ou não significativas, sendo que em 18 das 24 situações, tendem a piorar comparativamente às bandas na sua resolução original. Este facto poderá evidenciar a capacidade do algoritmo em tornar as imagens dessas bandas visualmente mais apelativas, mas, no entanto, não calculando de forma adequada os valores de reflectância dos objetos presentes na superfície terrestre.

Os coeficientes de correlação mais elevados, são o resultado do confronto entre o M2 S com o método 1 de extração da reflectância das imagens S2 (M1 S2) (fig. 68) e igualmente com o método 1 de extração da reflectância das imagens L8 (M1 L8) (fig. 69) nas LC. Selecionaram-se, portanto, estes métodos para a identificação do limiar mínimo dimensional das lagoas termocársicas por parte das imagens de satélite S2 e L8 para KWAK.

Com a análise aos gráficos de dispersão, entre a combinação de métodos que surtiu em coeficientes de correlação mais elevados, é possível observar o ajuste quase perfeito das bandas do espectro do visível do satélite S2 aos dados de verdade de terreno e o aumento da dispersão dos dados nas bandas do espectro do infravermelho próximo, com especial destaque para as bandas de *pansharpening*.

No L8 o conjunto de dados e respetivas linhas de tendência apresentam menor declive, quer seja nas bandas verde e vermelho, como também infravermelho próximo, sendo que nesta última a dispersão dos dados aumenta, embora a linha de tendência registe uma posição com menor declive, comparativamente às

bandas infravermelho próximo e vermelho próximo do S2, sendo que existem coeficientes de correlação mais elevados no L8 nas bandas destes comprimentos de onda.

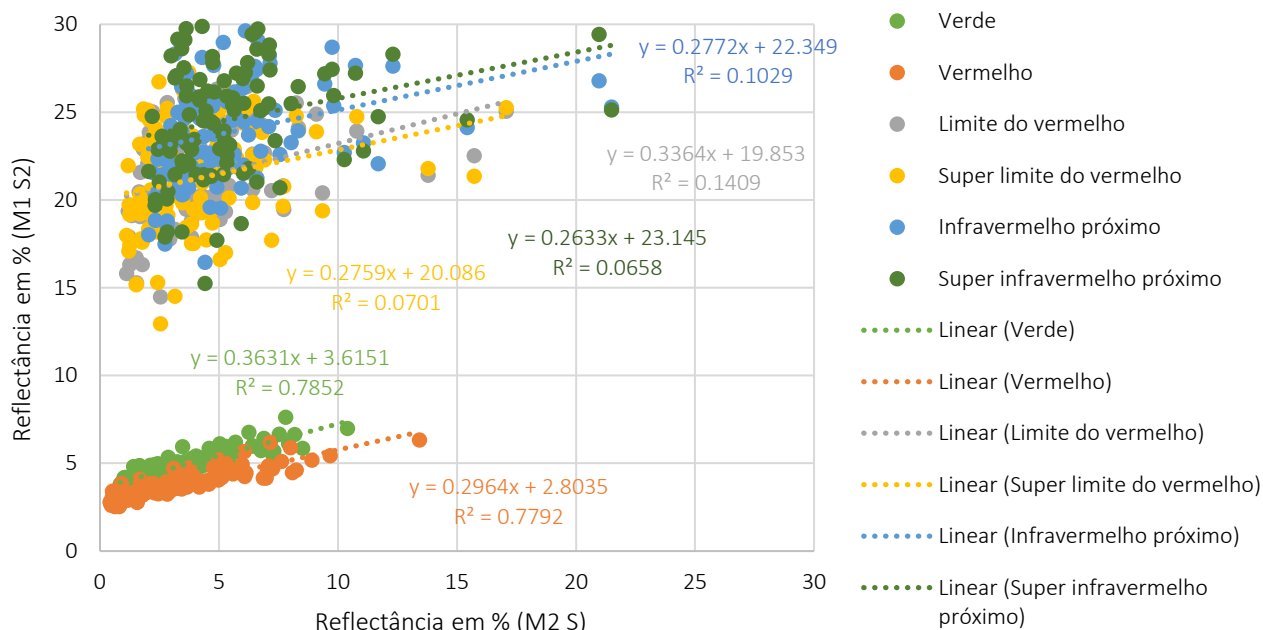


Figura 68: Melhores métodos de extração da reflectância em KWAK para o S2 (M2 S versus M1 S2)

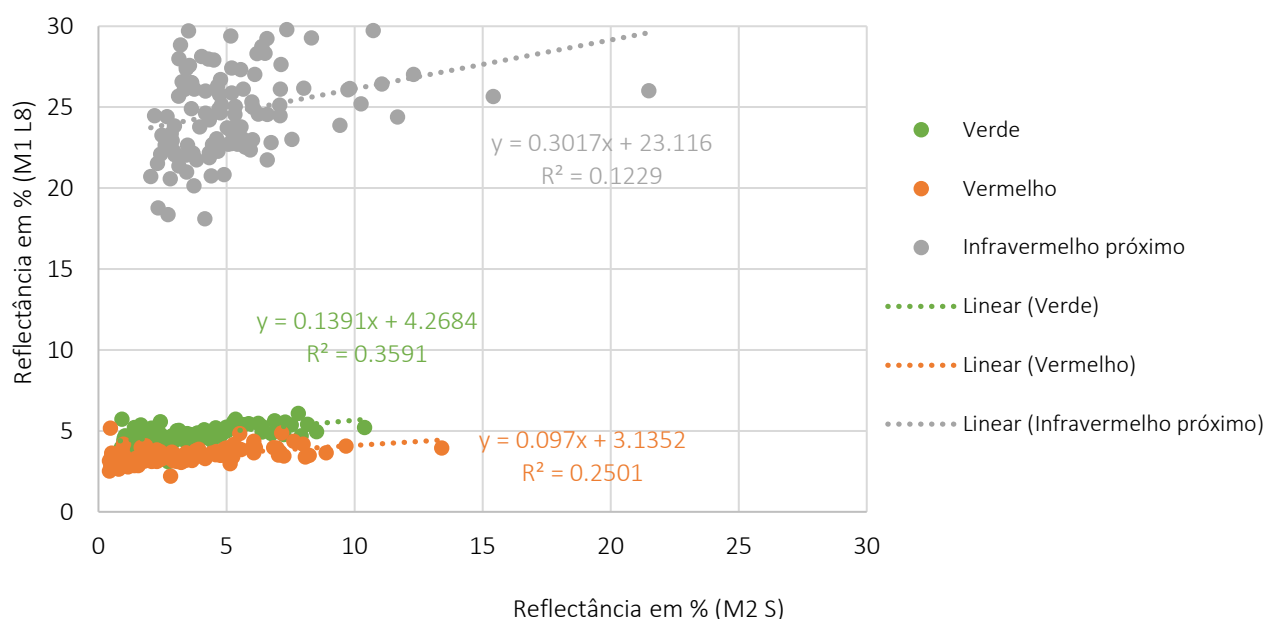


Figura 69: Melhores métodos de extração da reflectância em KWAK para o L8 (M2 S versus M1 L8)

### 5.1.3. SELEÇÃO DO MELHOR SENSOR DE SATÉLITE (*LANDSAT 8 VERSUS SENTINEL-2*)

O satélite S2 demonstrou valores de correlação elevados com os dados de verdade de terreno em todos os métodos, considerando as bandas do espectro do visível, algo que não aconteceu com o satélite L8, em que as correlações são predominantemente moderadas ou fracas positivas. Nas bandas dos comprimentos

de onda relativos ao espectro do infravermelho próximo, as correlações são mais fracas, não atingindo em nenhum método valores de correlação fortes ou muito fortes positivos, em qualquer dos satélites.

A seleção dos métodos de extração da reflectância teve em consideração todas as lagoas, individualmente em cada área de verdade de terreno (BGR e KWAK). Este pressuposto tornou evidente a existência de misturas espectrais considerando as lagoas de menores dimensões. Assim, a fim de se selecionar o melhor sensor para a realização da caracterização das dinâmicas espectrais intra-anuais dos lagos e lagoas existentes nas áreas de teste regional, procurou-se identificar o limiar mínimo dimensional a partir do qual as imagens de cada sensor de satélite (S2 e L8) podem ser utilizadas para a sua caracterização espectral. Para isso, calcularam-se correlações pela área das lagoas, nomeadamente excluindo-se a de área mínima sucessivamente, e calculando-se um novo coeficiente de correlação ( $R$ ) com base nas restantes. Considerou-se como limiar mínimo dimensional, a área da lagoa a partir da qual as correlações com os dados de verdade de terreno em todas as bandas se tornaram fortes positivas ( $R > 0,7$ ).

Em BGR, ao analisar-se os coeficientes de correlação por área das lagoas termocársicas, entre os dados de verdade de terreno e as bandas do satélite L8, torna-se evidente o aumento dos coeficientes de correlação nas bandas do espectro do visível de forma mais ou menos linear com o aumento da área das lagoas termocársicas, sendo que a partir do limiar dos 420 m<sup>2</sup> são fortes positivas ( $> 0.7$ ) (fig. 70). As bandas do espectro do visível possuem um comportamento muito idêntico. Por outro lado, com a banda infravermelho próximo do L8 a tendência não se revela a mesma que as bandas do espectro do visível. Nesta banda, os coeficientes são sempre muito fracos ou fracos positivos, sendo que diminuem de forma significativa a partir do limiar de lagoas com área superior a 1240 m<sup>2</sup>, atingindo-se até mesmo coeficientes negativos a partir desse limiar.

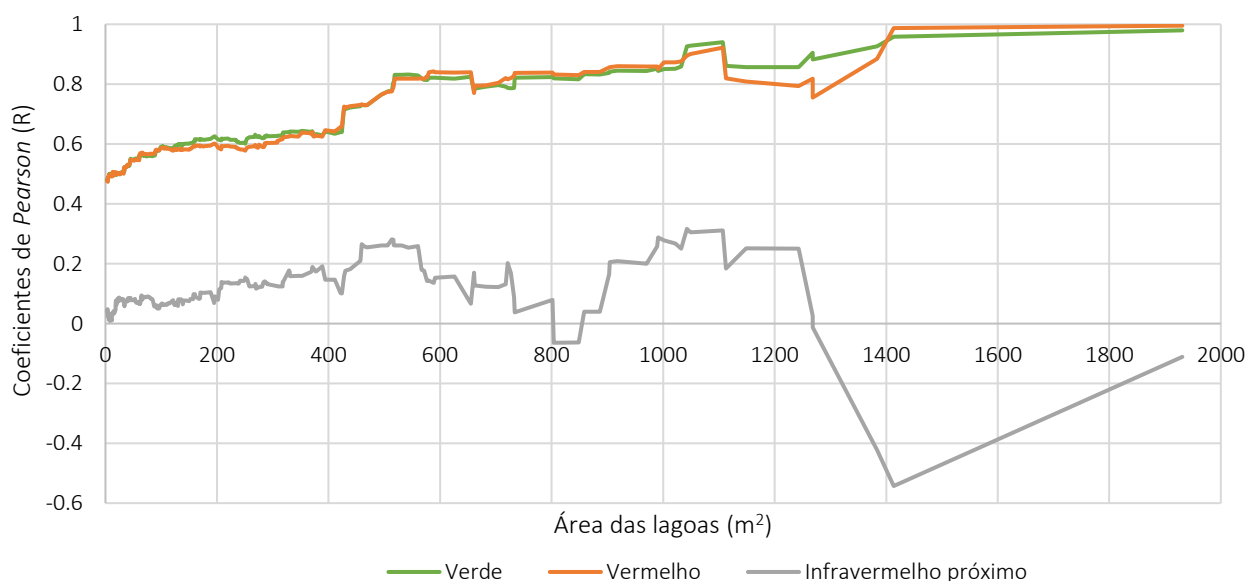


Figura 70: Coeficientes de correlação de *Pearson* ( $R$ ) por área das lagoas termocársicas em BGR entre os ortomosaicos multispectrais da *Sequoia* (M1 S) e as imagens de satélite L8 (M2 L8)

Com o satélite S2, os coeficientes de correlação são sempre fortes positivos entre as bandas do espectro do visível, algo que não acontece nas bandas do L8 (fig. 71). No entanto, tal como a banda do infravermelho próximo do L8, as bandas do espectro do infravermelho apresentam coeficientes baixos, sendo que não há uma tendência clara para um aumento dos mesmos, com o aumento da área das lagoas termocársicas. A partir do limiar dos 540 m<sup>2</sup>, os coeficientes de correlação destas bandas tendem a diminuir, chegando a coeficientes negativos.

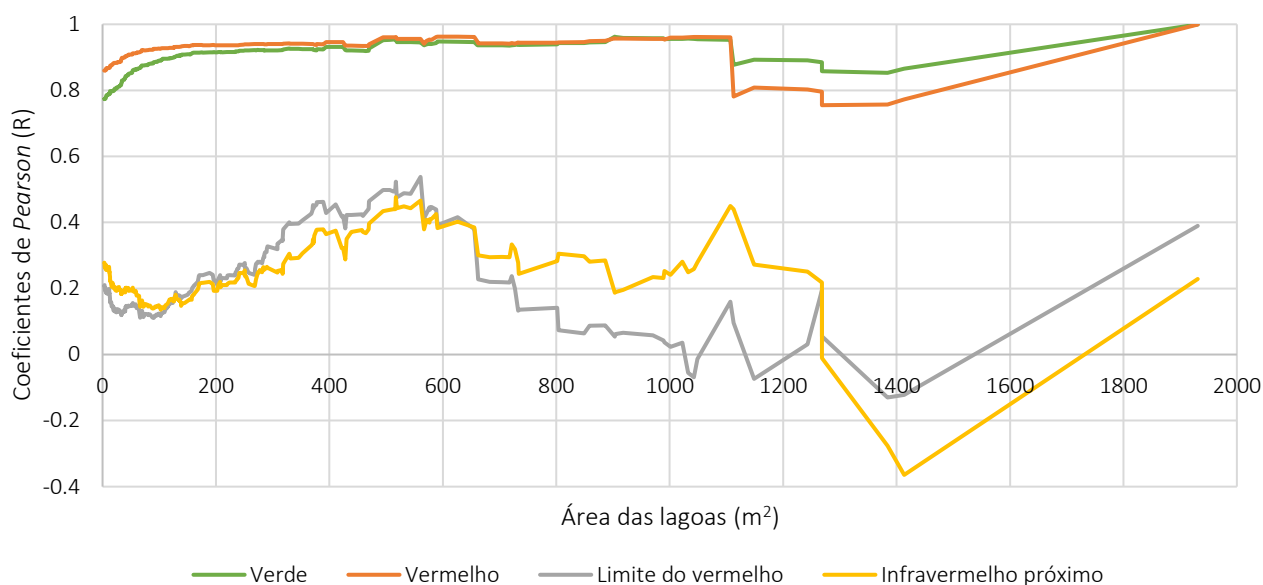


Figura 71: Coeficientes de correlação de *Pearson* (R) por área das lagoas termocársicas em BGR entre os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (M1 S) e as imagens de satélite S2 (M2 S2)

Ao analisar-se o comportamento de todas as bandas dos dois satélites (L8 e S2) em BGR torna-se evidente a ocorrência de um conjunto de quebras dos coeficientes de correlação, relativamente bem definidas em determinados limiares dimensionais das lagoas termocársicas. A partir do limiar de lagoa com 1110 m<sup>2</sup> ocorre uma quebra nos valores de correlação de todas as bandas, com a sua diminuição de forma acentuada. Nas bandas do espectro do infravermelho próximo verifica-se não só essa quebra, como também outra quebra próxima dos 550 m<sup>2</sup> de dimensão das lagoas termocársicas, novamente com a diminuição dos coeficientes de correlação a partir desse limiar, em ambos os satélites. Assim, existem uma série de fatores, eventualmente externos aos dados trabalhados, importantes e condicionantes dos coeficientes de correlação, como por exemplo a morfologia das lagoas desta escala, eventualmente a posição e exposição das lagoas ao vento, maior ou menor influência de sombras e nebulosidade, a presença de vegetação aquática, maior ou menor conteúdo de clorofila, entre outros fatores ou combinação de fatores, espacialmente e temporalmente variáveis. Não podem ainda ser descurados fatores como as diferentes características dos sensores utilizados, eventuais problemas relacionados com a desadequada calibração radiométrica das fotografias através do alvo de calibração, dado que se realizou nesta área o primeiro voo com a câmara multiespectral *Sequoia*, bem como a passagem de nuvens aquando da captação das fotografias áreas e eventuais falhas relacionadas com a

incapacidade de reconstrução de superfícies de água através de *Structure from Motion*, ocorrendo manipulação dos valores de reflectância no seu interior, sobretudo nas de maiores dimensões (Pix4D, 2017).

Os resultados são mais claros em KWAK. Regista-se um progressivo aumento dos coeficientes de correlação em todas as bandas, de ambos os satélites, à exceção das bandas de *pansharpening* do S2, mediante o progressivo aumento da área das lagoas termocársicas.

Em KWAK, com o satélite L8 as correlações com as bandas do espectro do visível inicialmente são moderadas positivas, sendo que a banda verde apresenta os coeficientes de correlação positivos mais elevados (fig. 72). Nesta banda as correlações fortes positivas são atingidas a partir das lagoas com área superior aos 105 m<sup>2</sup>, enquanto que com a banda vermelho são atingidas com um limiar de área superior aos 250 m<sup>2</sup>. As correlações com a banda infravermelho próximo são mais fracas, embora igualmente positivas. Esta banda só apresenta correlações fortes positivas com os dados de verdade de terreno a partir do limiar de área das lagoas termocársicas superior aos 645 m<sup>2</sup>, embora com valores de p superiores a 0,05, sendo, por isso, consideradas não significativas.

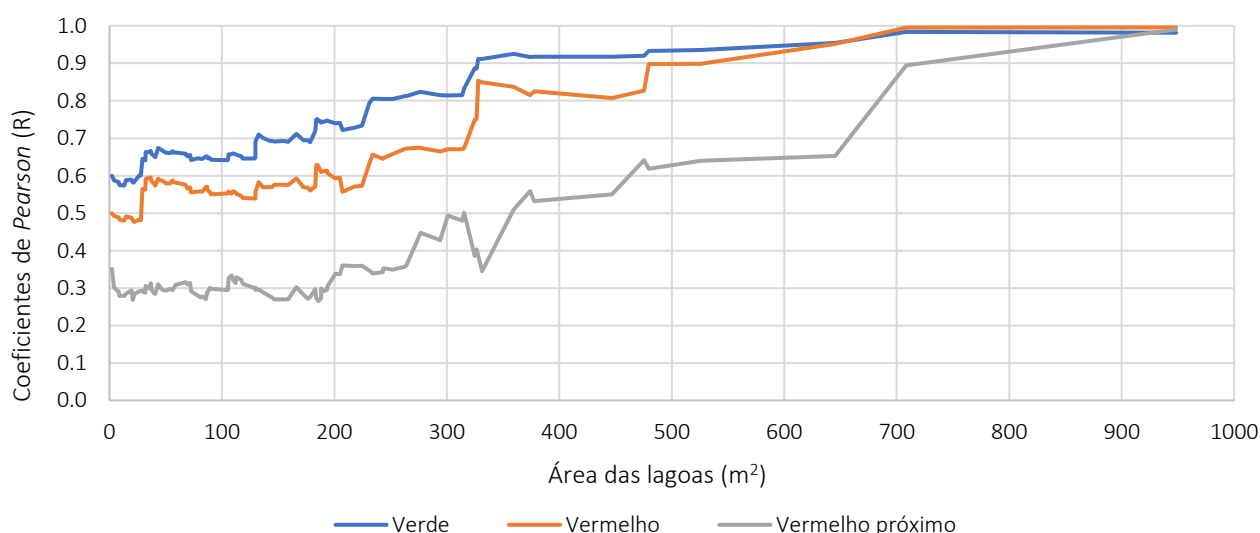


Figura 72: Coeficientes de correlação de *Pearson* (R) por área das lagoas termocársicas em KWAK entre os ortomosaiscos multiespectrais da *Sequoia* (M2 S) e imagens de satélite L8 (M1 L8)

Com o satélite S2 as bandas relativas ao espectro do visível, possuem sempre correlações fortes positivas com os dados de verdade de terreno, sendo que é atingido um valor próximo da perfeição a partir dos 500 m<sup>2</sup> (fig. 73). No entanto, isto não acontece com as bandas relativas ao vermelho próximo e infravermelho próximo. Nestas bandas regista-se a diminuição dos coeficientes até aos 200 m<sup>2</sup>, evidenciando a existência de misturas espectrais nas lagoas mais pequenas, associadas à dimensão do pixel (20 metros), sendo que a partir desse limiar há uma melhoria de forma significativa. As correlações tornam-se fortes positivas a partir dos 350 m<sup>2</sup> (> 0.7) sendo significativas, considerando valores de p inferiores a 0,01. Os coeficientes de correlação tendem a aumentar de forma progressiva a partir desse limiar.

A aplicação do algoritmo *Super-resolution* evidencia, coeficientes de correlação piores e instáveis com os dados de verdade de terreno, comparativamente às bandas na sua resolução original. Nestas bandas o comportamento é semelhante às bandas na sua resolução original, com um aumento dos coeficientes de correlação até aos 350 m<sup>2</sup>, sendo que a partir desse limiar há uma diminuição significativa dos coeficientes, não se atingindo correlações fortes positivas significativas em nenhuma circunstância.

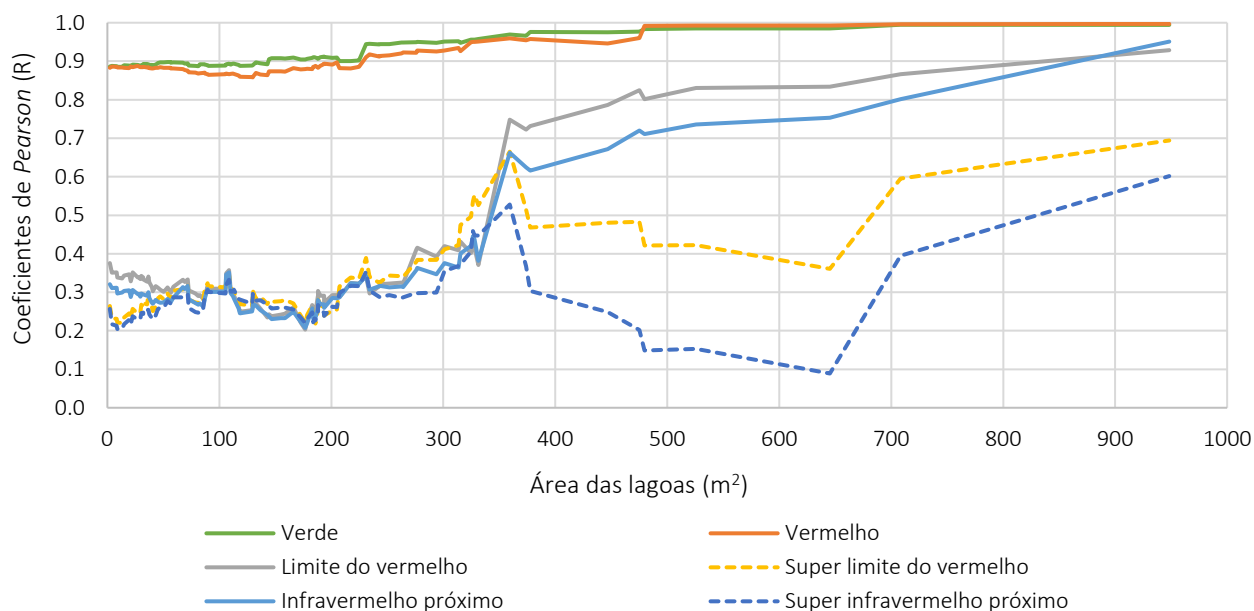


Figura 73: Coeficientes de correlação de *Pearson* (*R*) por área das lagoas termocársicas em KWAK entre os ortomosaiscos multiespectrais da *Sequoia* (M2 S) e imagens de satélite S2 (M1 S2)

A realização de correlações de *Pearson* de forma cumulativa por área das lagoas termocársicas permitiu a identificação do limiar mínimo de detecção das lagoas por parte de cada sensor, embora se tenha verificado a existência de ambiguidades entre os resultados de ambas as áreas de verdade de terreno. Assim, consideraram-se os resultados obtidos na área de verdade de terreno de KWAK como referência para as áreas de teste regional, mediante confirmação de representatividade morfológica das lagoas utilizadas como amostra. O esperado seria a verificação de um limiar de detecção idêntico em ambas as áreas de estudo, embora isso não tenha acontecido devido a fatores (ou combinação de fatores) não apurados na totalidade no decorrer desta dissertação.

O limiar mínimo de detecção corresponde à área da lagoa em que os dados de satélite apresentam valores de correlação fortes positivos com os dados de verdade de terreno em todas as bandas utilizadas para comparação. Através da presente metodologia, considera-se que o limiar mínimo de detecção das lagoas por parte do L8, poderá ser superior a 645 m<sup>2</sup>. Por outro lado, o limiar mínimo de detecção recorrendo à utilização de imagens S2 é de 350 m<sup>2</sup>, considerando valores de *p* significativos. Assim, destaca-se melhorias introduzidas pelo S2 ao nível da sua resolução, sobretudo espacial, utilizando-se, portanto, imagens provenientes deste sensor para a monitorização das características espectrais intra-anuais dos lagos e lagoas existentes nas áreas de teste regional.



## 5.2. MONITORIZAÇÃO ESPECTRAL DOS LAGOS E LAGOAS (VALE DE BGR E VALE DE KWAK)

### 5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS LAGOS E LAGOAS

O Vale de BGR apresenta um total de 2 445 lagos e lagoas (fig. 74 – A). O Vale de KWAK apresenta uma menor quantidade, contabilizando-se um total de 999 (fig. 74 – B). Em ambas as áreas de estudo há uma predominância relativa à concentração de lagoas nos fundos de vale, sendo parte destas de fusão, associadas, portanto, ao colapso de *palsas* e *lithalsas* em áreas com termocarso (Vallée & Payette, 2007).

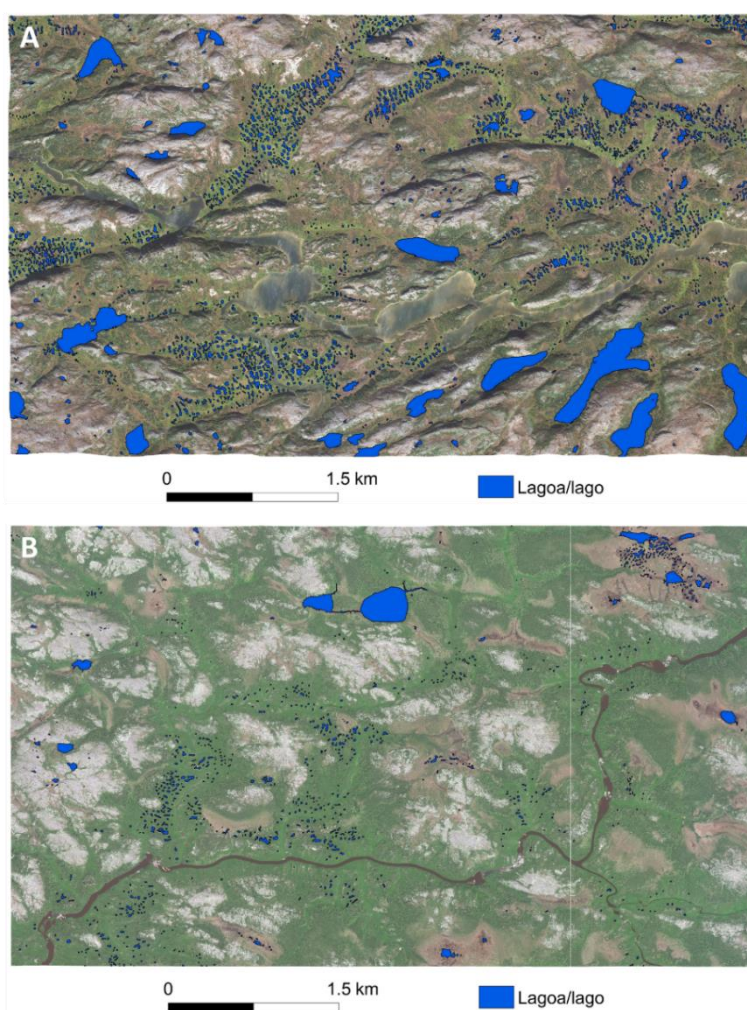


Figura 74: Lagos e lagoas no Vale de BGR (A) e de KWAK (B)

O total de área abrangida por lagos e lagoas é substancial no Vale de BGR, perfazendo 1,9 km<sup>2</sup>, comparativamente ao Vale de KWAK, em que a área total abrangida é de cerca de 0,4 km<sup>2</sup> (tabela 12). No Vale de BGR há uma densidade de 98 lagos e lagoas por quilómetro quadrado, e no Vale de KWAK há uma densidade menor, sendo de 40 lagos e lagoas por quilómetro quadrado. Em média os lagos e lagoas são de maior dimensão no Vale de BGR comparativamente ao Vale de KWAK, com 771 m<sup>2</sup> e 394 m<sup>2</sup>, sendo o desvio padrão

de 6 342 m<sup>2</sup> e 4 334 m<sup>2</sup>, respetivamente. O valor de área mínima é de 16 m<sup>2</sup> no vale de BGR e 11 m<sup>2</sup> no vale de KWAK. O vale de BGR apresenta o lago de maior dimensão, com 134 328 m<sup>2</sup>.

Tabela 12: Medidas estatísticas da área dos lagos e lagoas presentes no Vale de BGR e no Vale de KWAK

|               | Vale de BGR              | Vale de KWAK           |
|---------------|--------------------------|------------------------|
| Contagem      | 2 445                    | 999                    |
| Área mínima   | 16 m <sup>2</sup>        | 11 m <sup>2</sup>      |
| Área máxima   | 194 092 m <sup>2</sup>   | 134 238 m <sup>2</sup> |
| Soma          | 1 887 083 m <sup>2</sup> | 394 035 m <sup>2</sup> |
| Média         | 771 m <sup>2</sup>       | 394 m <sup>2</sup>     |
| Desvio padrão | 6 342 m <sup>2</sup>     | 4 334 m <sup>2</sup>   |

Tal como nas áreas de verdade de terreno, ambos os vales são caracterizados pela presença de lagoas de pequena dimensão, sendo que mais de 94% no vale de KWAK e de 81% no vale de BGR têm uma dimensão inferior aos 500 m<sup>2</sup> (fig. 75).

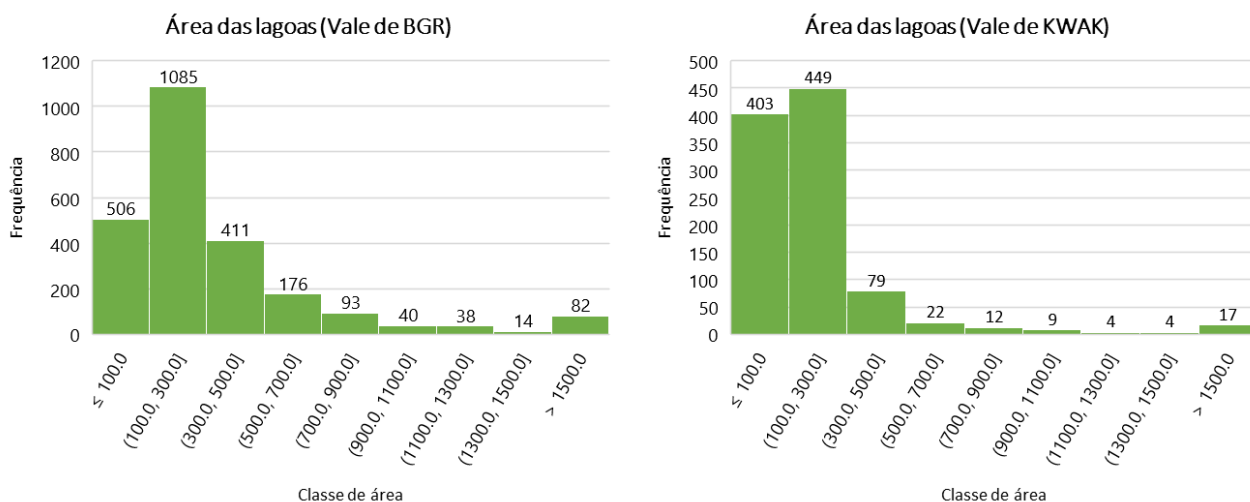


Figura 75: Distribuição por classes de área dos lagos e lagoas no Vale de BGR e de KWAK

## A. COMPARAÇÃO MORFOLÓGICA DOS LAGOS E LAGOAS

Utilizaram-se as mesmas medidas e índices de forma analisados nas áreas de verdade de terreno (ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*), para os polígonos relativos aos lagos e lagoas presentes nas áreas de teste regional (imagens de satélite WV 2 e WV 4). Assim, procurou-se perceber a representatividade das lagoas utilizadas como amostra na área de verdade de terreno, relativamente à população de lagos e lagoas identificada nas áreas de teste regional. Esta análise comparativa revelou-se essencial, uma vez que, a forma dos lagos e das lagoas condiciona, necessariamente, a sua capacidade em conter ou não os pixéis das imagens de satélite, sendo que quanto mais inclusos no interior dos lagos e lagoas, melhor numa ótica de caracterização espectral (fig. 76).

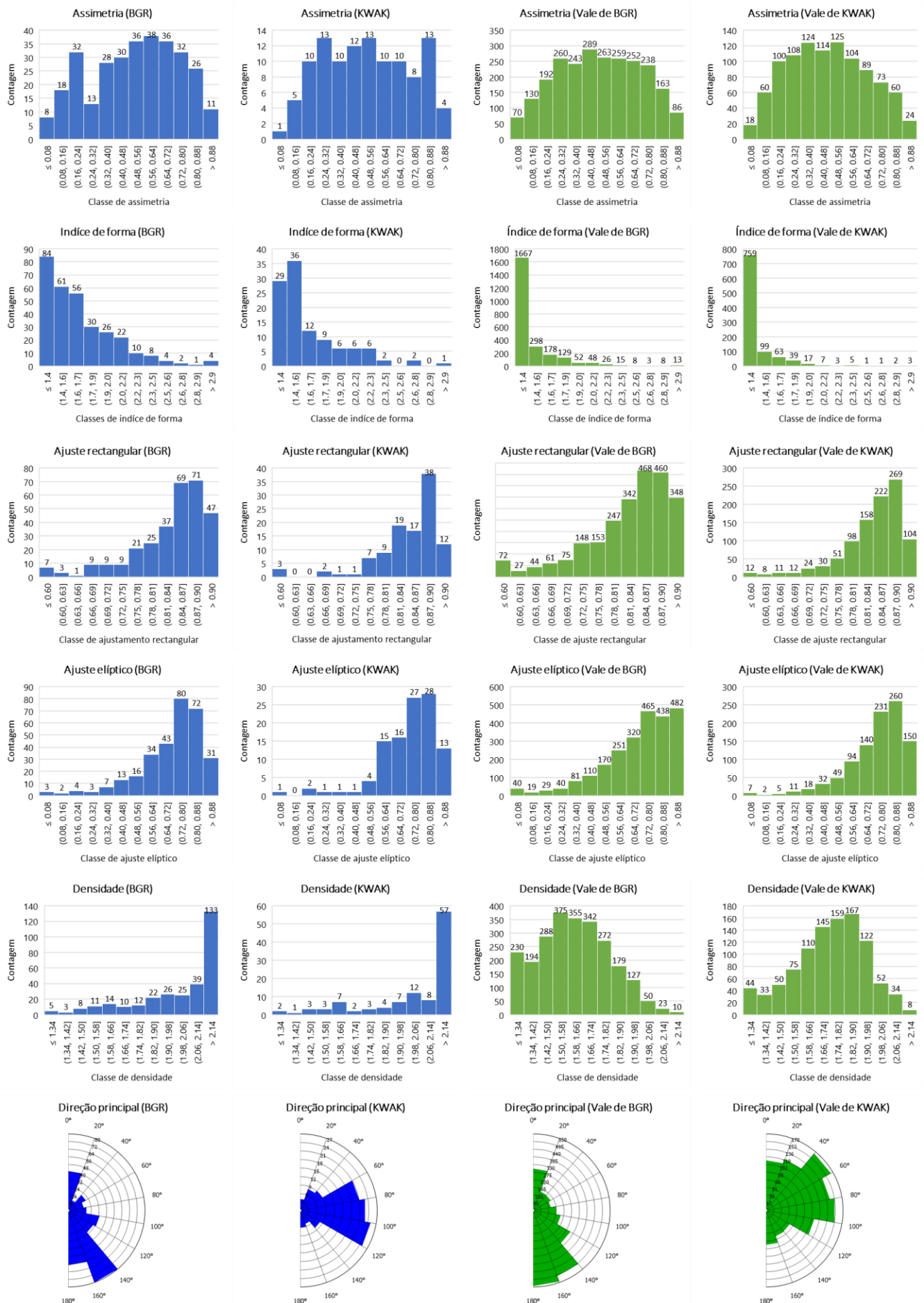


Figura 76: Métricas e índices de forma para os lagos e lagoas das áreas de verdade de terreno (ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* – gráficos a azul) e das áreas de teste regional (imagens WV2 e WV4 – gráficos a verde)

A métrica relativa à assimetria apresenta uma distribuição distinta dos conjuntos de dados pelas classes comparando-se as áreas de verdade de terreno e as áreas de teste regional. Nos Vales há tendência para uma distribuição normal, enquanto nas áreas de verdade de terreno ocorrem *clusters* relativamente bem definidos. Assim, nos Vales de BGR e de KWAK os lagos distribuem-se por todas as classes de assimetria, com os maiores valores a serem registados nas classes centrais (predominância de lagos e lagoas com assimetria moderada), o que evidencia diversidade de formas existentes.

O índice de forma mostra relativamente a mesma tendência em ambas as áreas, sendo que se regista uma maior frequência de lagos e lagoas com valores deste índice baixos, o que evidencia a existência de formas suaves e com fronteiras bem definidas. Regista-se igualmente concordância entre as áreas de verdade de terreno e áreas de teste regional, de ambas as áreas de estudo, considerando os índices relativos ao ajuste retangular e ao ajuste elíptico. Assim, a distribuição dos dados com enviesamento à esquerda evidencia a predominância de lagos e lagoas que tendem a se ajustar relativamente bem a elipses e a retângulos, o que afirma a sua aproximação a este tipo de formas, independentemente do seu tamanho.

A métrica relativa à densidade dos polígonos obtém o mesmo comportamento em ambas as áreas de estudo, considerando as lagoas presentes nas áreas de verdade de terreno, o que indica a existência de lagoas predominantemente quadradas. Por outro lado, nas escalas de teste regional, verifica-se que no Vale de BGR a distribuição dos dados adquire um ligeiro enviesamento para a direita (valores de densidade inferiores indicam a presença de formas de lagos e lagoas idênticas a filamentos) e no Vale de KWAK a distribuição dos dados adquire um ligeiro enviesamento para a esquerda (valores de densidade superiores indicam a presença de formas de lagos e lagoas idênticas a quadrados). Assim, no Vale de BGR constata-se a existência de lagos e lagoas que apesar de se ajustarem predominantemente a retângulos e elipses, possuem uma forma ligeiramente mais fina e alongada (parecida a um filamento) do que no Vale de KWAK, em que os lagos e lagoas não só se ajustam predominantemente a retângulos e elipses, como são menos alongados e, por conseguinte, mais quadrados.

Para além da métrica relativa à densidade, a direção principal dos lagos e lagoas evidencia ligeiras diferenças na distribuição dos dados pelas mesmas classes. No Vale de BGR, destaca-se a predominância de lagos e lagoas orientadas de sul para norte (inferior a  $20^\circ$  e  $160$  a  $180^\circ$ ) e de su-sudeste para nor-noroeste (entre  $140^\circ$  e  $160^\circ$ ), bem como lagos e lagoas orientadas de oeste para este (entre  $60^\circ$  a  $120^\circ$ ) no Vale de KWAK, embora nesta área de teste regional se verifique a existência de lagos e lagoas em mais direções comparativamente à sua área de verdade de terreno, com especial destaque de sudeste para noroeste (entre  $40^\circ$  a  $60^\circ$ ).

A comparação entre os índices e métricas de forma dos polígonos, evidencia a existência de representatividade morfológica das lagoas utilizadas como amostras nas áreas de verdade de terreno, relativamente à população de lagos e lagoas existente nas áreas de teste regional. A importância desta representatividade, está relacionada com o facto de as formas dos lagos e lagoas, condicionarem a sua capacidade em conter os pixéis das imagens de satélite, independentemente da sua dimensão,

consequentemente potencialmente manipulando os valores de reflectância das bandas, devido a influências exercidas por coberturas de solo limítrofes. A existência desta representatividade reforça o limiar dimensional detetado na área de verdade de terreno num todo regional, considerando os resultados de correlação obtidos e a predominância de formas envolvidas nessas áreas.

Dados os resultados obtidos no confronto de métodos de extração da reflectância na área de verdade de terreno de KWAK em que o satélite S2 revelou coeficientes de correlação fortes positivos com os dados de verdade de terreno, considerando lagoas com dimensão superior aos 350 m<sup>2</sup>, considera-se os resultados da comparação morfológica mais importantes para essa área de estudo. Assim, destaca-se a representatividade das lagoas utilizadas como amostra na área de verdade de terreno, comparativamente à população de 999 lagos e lagoas existentes num todo regional. As métricas e índices de forma relativos ao ajuste retangular e ajuste elíptico possuem distribuições de dados pelas mesmas classes idênticas em ambas as áreas, o que revela a predominância de lagos e lagoas essencialmente circulares. A assimetria, a densidade e direção principal dos lagos e lagoas regista ligeiras diferenças face às lagoas de amostra. A distribuição do conjunto de dados pelas classes de assimetria indica, naturalmente, uma maior diversidade de formas na área de teste regional, bem como a existência de uma predominância da direção dos lagos e lagoas ligeiramente diferente, sendo que esta condição, não afeta, no entanto, a sua morfologia.

Regista-se ainda uma vantagem relativa à utilização da área de teste regional de KWAK, comparativamente à área de teste regional de BGR, sendo que nesta última, considerando a distribuição do conjunto de dados pelas classes de densidade, os lagos e lagoas tendem à forma de um filamento de maneira mais significativa, sendo que em KWAK, tendem à forma de um quadrado de maneira mais significativa, o que potencia a contenção dos pixéis das imagens de satélite.

### **5.2.2. RESULTADOS E ERROS NOS PROCESSOS DE DELIMITAÇÃO DOS LAGOS E LAGOAS (*SEQUOIA VERSUS WORLDVIEW*)**

Os limites dos lagos e lagoas foram obtidos a partir de imagens multiespectrais de duas fontes, sendo elas os ortomosaicos multiespectrais de muito alta resolução da câmara *Sequoia* para as áreas de verdade de terreno e as imagens de satélite de muito alta resolução WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional. Utilizaram-se ainda diferentes métodos para o processamento, tratamento e classificação das imagens. Nesta perspetiva torna-se importante perceber o erro associado aos diferentes métodos utilizados, bem como consequências relativas às diferentes características das imagens multiespectrais utilizadas analogamente à qualidade da sua georreferenciação. Como tal, procedeu-se, nesta fase, à comparação entre os limites das lagoas delimitadas a partir dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* e das imagens WV 2 e WV 4 para as áreas de verdade de terreno.

Existem fatores iniciais condicionantes da extração dos limites dos lagos e lagoas. Um deles está relacionado com as diferentes resoluções espaciais das imagens utilizadas, apresentando os ortomosaicos



multiespectrais da *Sequoia* uma resolução de 13 centímetros, as imagens WV 2 uma resolução de 46 centímetros, na banda pancromática e as imagens WV 4 uma resolução de 30 centímetros, nessa mesma banda. Outro fator está relacionado com a data de aquisição das imagens WV 2 (11 de setembro de 2017) e WV 4 (29 de julho de 2017) comparativamente aos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (31 de agosto de 2017 para BGR e 1 de setembro de 2017 para KWAK). O espaçamento temporal entre imagens foi maior com as imagens WV 4, portanto, para KWAK, sendo de 35 dias. Para BGR, o espaçamento temporal entre imagens foi de 10 dias. Este aspeto revela-se importante uma vez que oscilações no nível da água poderão influenciar os limites extraídos. Inclusivamente, algumas lagoas de menor dimensão poderão drenar durante o período estival.

Na área de estudo de BGR, em algumas situações, registaram-se falhas de georreferenciação de alguns metros (8 metros no máximo) (fig. 77). Estes erros inerentes ao processo de georreferenciação são maiores na margem sudeste da área de pormenor devido à influência topográfica nas imagens WV, dado o seu processo de ortorrectificação que teve como base um MDT de fraca resolução (50 metros). Este fator revela a existência de problemas não lineares relativos à georreferenciação de alguns lagos e lagoas nesta área de teste regional devido a influências topográficas (necessidade de um método de transformação mais completo ao invés do linear utilizado).

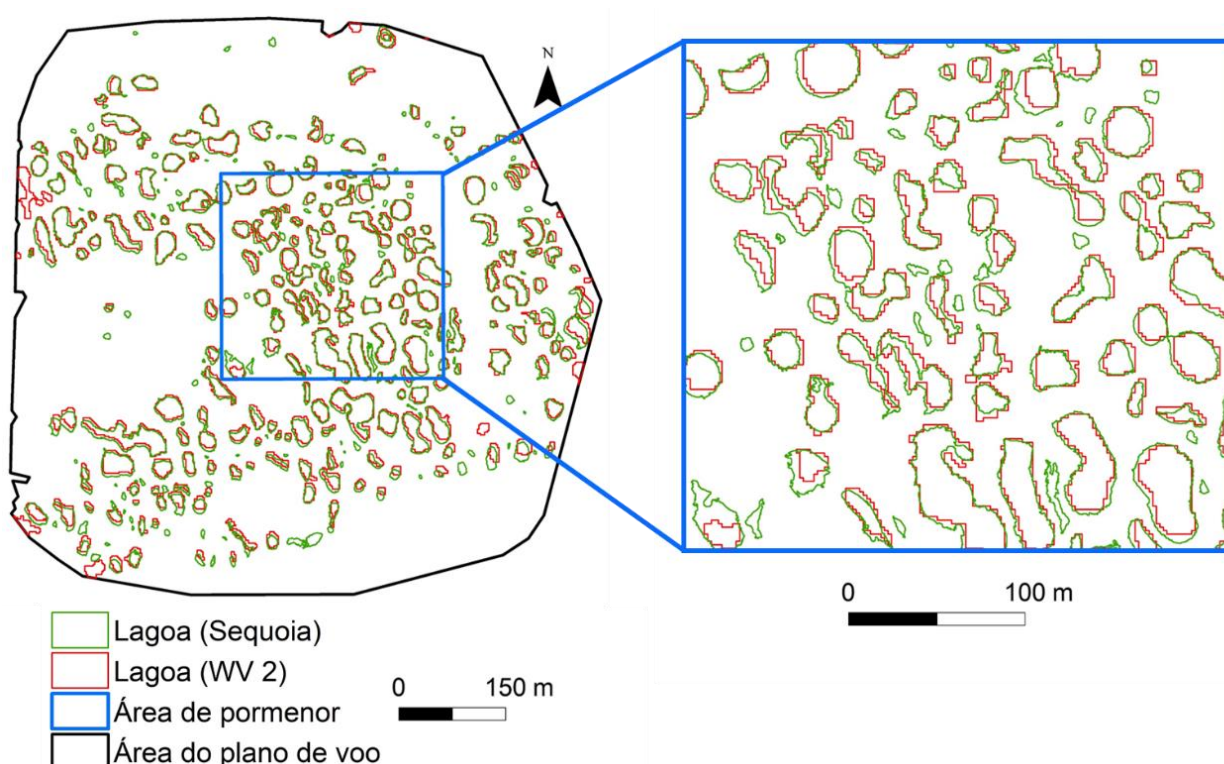


Figura 77: Lagoas delimitadas tendo como base os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (dados de verdade de terreno) e as imagens de muito alta resolução WV 2 (dados de teste regional) para BGR

Com os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* identificaram-se 308 lagoas na área de verdade de terreno de BGR, sendo que para a mesma área abrangida pelo plano de voo, identificaram-se apenas 214



lagoas com as imagens WV 0 que revela grandes falhas relativas à delimitação de lagoas de pequena dimensão. O método utilizado para a classificação dos lagos e lagoas, partindo das imagens WV 2, não foi capaz de identificar lagoas com dimensão inferior a 30 m<sup>2</sup>. Por outro lado, com os métodos e respetivos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* classificaram-se 64 lagoas com dimensão inferior a 30 m<sup>2</sup>.

Em KWAK é possível destacar a qualidade relativa aos diferentes processos utilizados para a georreferenciação das imagens, com especial destaque para o processo de ortorrectificação das imagens WV 4, que teve como base um MDT com resolução espacial de 20 metros. Assim, a sobreposição entre as áreas das lagoas é quase perfeita (fig. 78). Verifica-se apenas um ligeiro exagero nos limites extraídos das imagens WV 4 comparativamente aos limites extraídos dos ortomosaicos da *Sequoia*, erro que pôde em parte ter sido introduzido pela diferença temporal entre as imagens, bem como diferentes resoluções espaciais das imagens. A proximidade entre resoluções espaciais das imagens, potenciou ainda coerência e qualidade na extração dos limites das lagoas.

Em KWAK identificaram-se 109 lagoas com os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* e 117 lagoas com as imagens WV 4, sendo que devido a distorções introduzidas nas lagoas nas áreas limítrofes do voo, procedeu-se à não contemplação dessas lagoas na área de verdade de terreno. Registam-se, no entanto, algumas falhas relativas novamente à delimitação de lagoas de pequenas dimensões, sendo que a lagoa com área mínima identificada nas imagens WV 4 é de 27 m<sup>2</sup>. Nos ortomosaicos *Sequoia* classificaram-se 10 lagoas inferiores a essa dimensão.

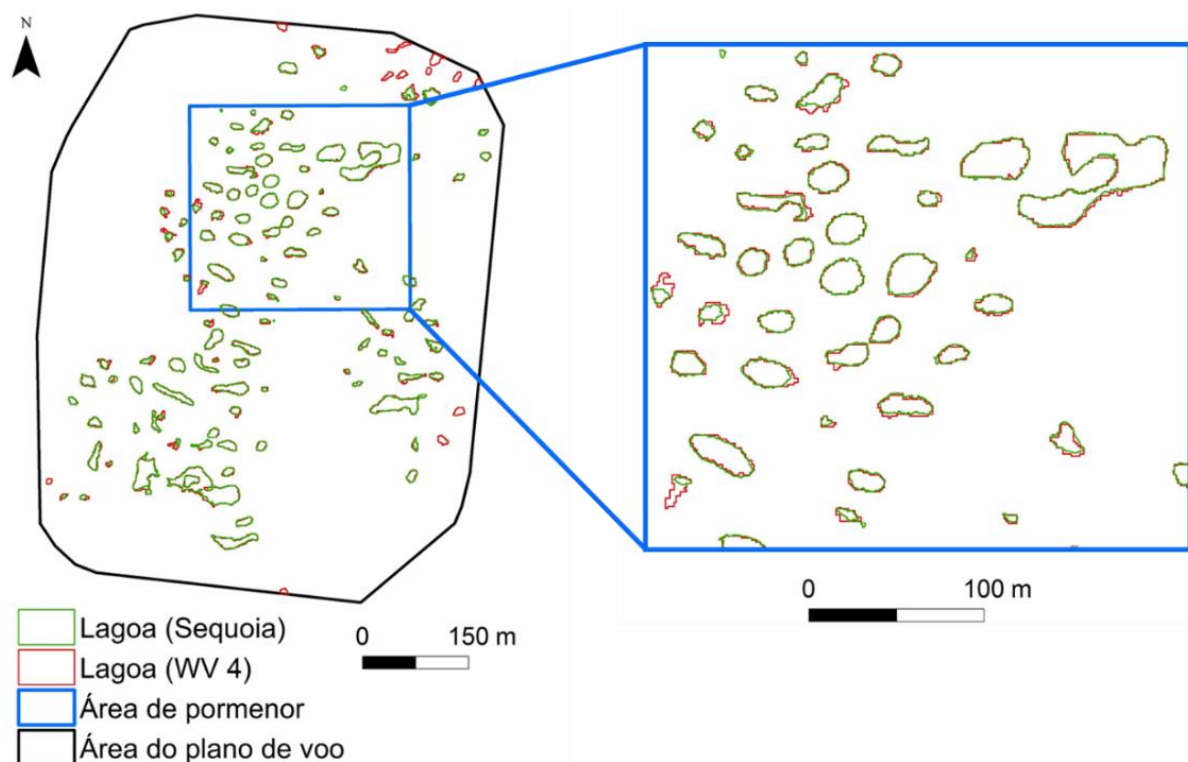


Figura 78: Lagoas delimitadas tendo como base os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* (dados de verdade de terreno) e as imagens de muito alta resolução WV 4 (dados de teste regional) para KWAK

### 5.2.3. COMPARAÇÃO COM BASES DE DADOS MUNDIAIS (GLWD E GSWE)

As bases de dados mundiais atualmente disponíveis apresentam algumas debilidades no que toca à contemplação de pequenos lagos e lagoas. Se compararmos a *Global Lakes Wetlands Database* (GLWD) desenvolvida no final do século XX, com a base de dados produzida para as áreas de teste regional, é possível verificar falhas relacionadas com a fraca resolução da informação de base utilizada para a realização da inventariação (fig. 79). O resultado traduz-se numa extrema generalização dos corpos de água e pântanos a nível global.

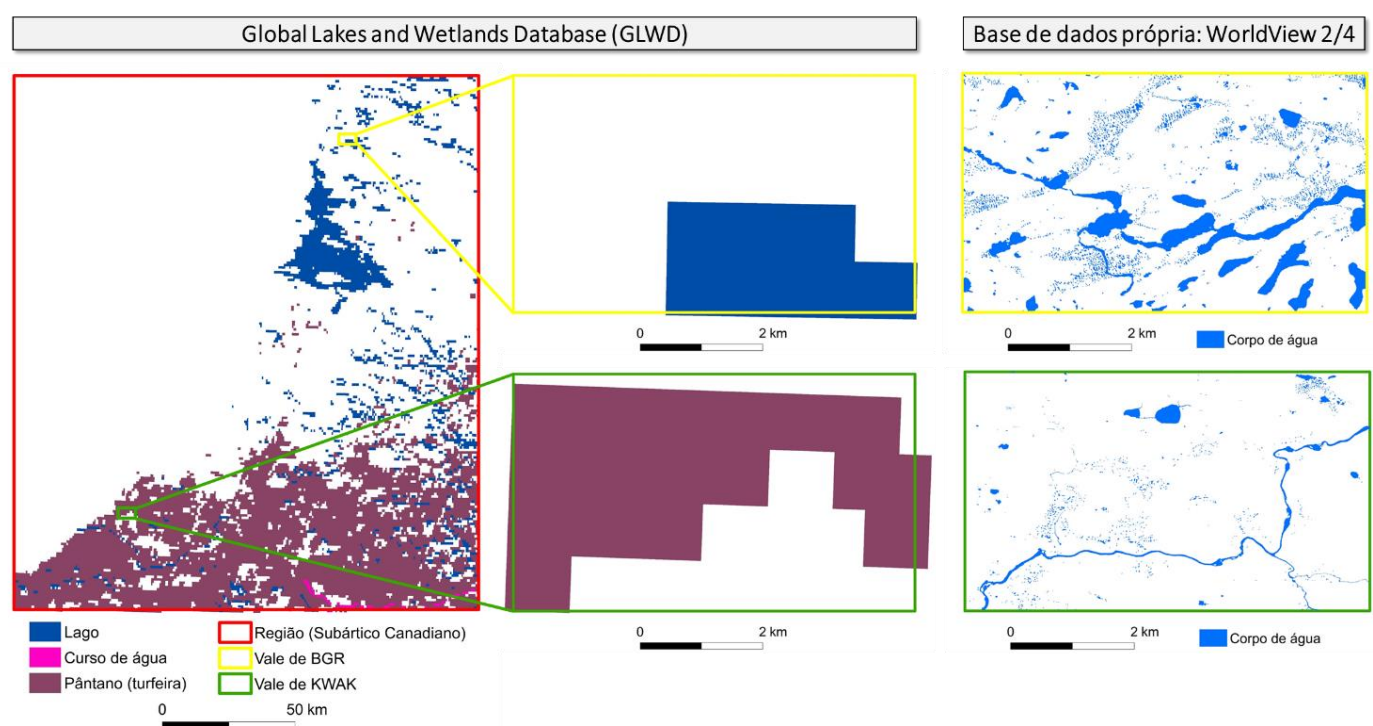


Figura 79: Comparação da base de dados *Global Lakes and Wetlands Database* (GLWD) com a base de dados produzida através do tratamento e classificação de imagens WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional

Apesar da base de dados atual mais avançada ser a *Global Surface Water Explorer* (GSWE), esta ainda mostra debilidades na identificação e monitorização de lagoas. Se a compararmos com a produzida para as áreas de teste regional, torna-se claro que, embora represente um grande avanço face à base de dados GLWD, continuam a existir problemas inerentes à resolução da informação de base utilizada, que consiste essencialmente em compilações de imagens *Landsat* (fig. 80). O GSWE identifica um total de 69 lagos e lagoas no Vale de BGR e 56 no Vale de KWAK, totalizando uma área de 2,18 km<sup>2</sup> e 0,32 km<sup>2</sup> respetivamente. A base de dados produzida nesta dissertação, evidencia a existência de um total de 2 445 lagos e lagoas no Vale de BGR e 999 no Vale de KWAK, totalizando uma área de 3,17 km<sup>2</sup> e 0,77 km<sup>2</sup>, respetivamente. Estes valores revelam a falta de capacidade de deteção, por parte da GSWE, de 31% da área total ocupada por lagos e lagoas no Vale de BGR e 58% no Vale de KWAK.

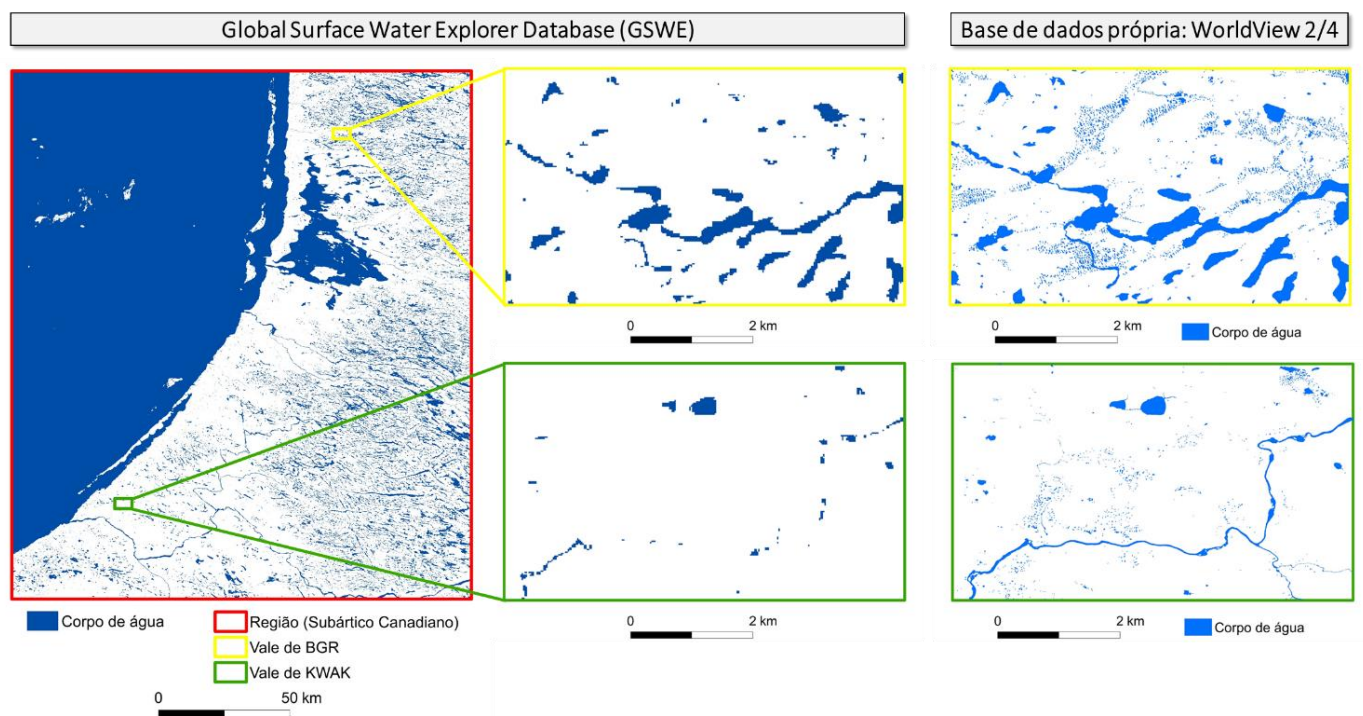
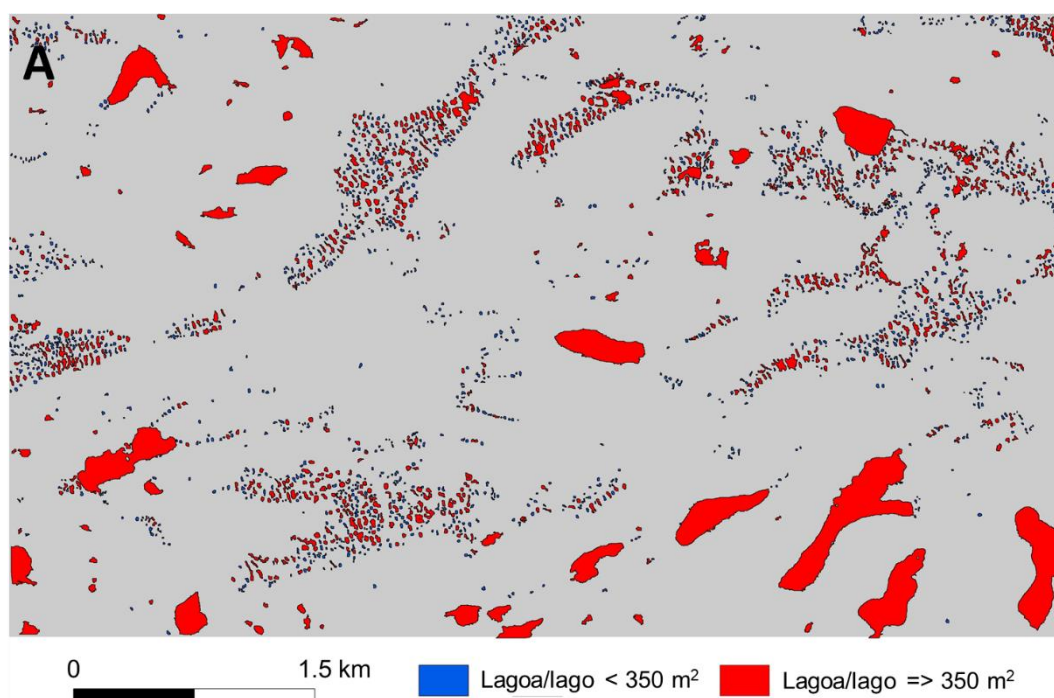


Figura 80: Comparação da base de dados *Global Surface Water Explorer* (GSWE) com a base de dados produzida através do tratamento e classificação de imagens WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional

#### 5.2.4. CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL INTRA-ANUAL DOS LAGOS E LAGOAS

O satélite S2 apresentou coeficientes de correlação fortes positivos com os dados de verdade de terreno, considerando lagoas de dimensão superior a  $350 \text{ m}^2$ . No Vale de BGR, contabilizaram-se, no total 2 445 lagoas e lagoas, sendo 30% de dimensão superior a  $350 \text{ m}^2$  (fig. 81 – A). O Vale de KWAK apresenta um total de 999 lagoas e lagoas, sendo 11% de dimensão superior a  $350 \text{ m}^2$  (fig. 81 – B).



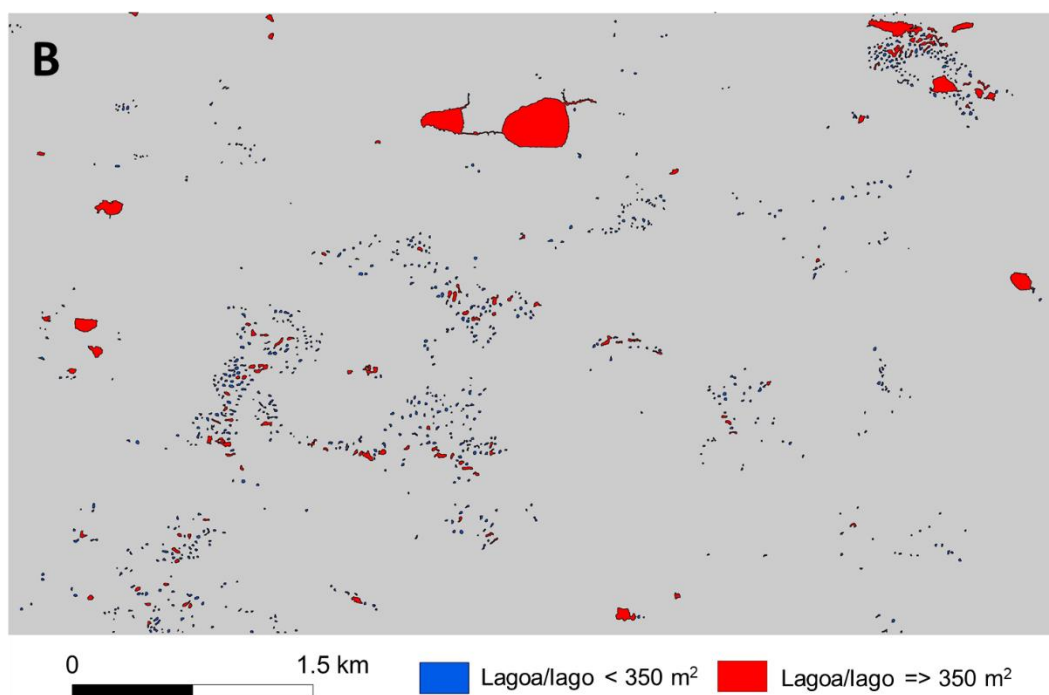


Figura 81: Lagos e lagoas com dimensão inferior e superior a 350 m<sup>2</sup>, limiar que possibilita a sua monitorização com imagens S2 na área de teste regional do Vale de BGR (A) e do Vale de KWAK (B)

Apesar das percentagens serem relativamente baixas ao nível do número de lagos e lagoas com dimensão superior a 350 m<sup>2</sup> em ambas as áreas de estudo, se considerarmos a área abrangida pelos(as) mesmos(as), verifica-se que as imagens S2 são capazes de discriminar, caracterizar e monitorizar 85% da área total de lagos e lagoas existentes no Vale de BGR e 73% da área total de lagos e lagoas existentes no Vale de KWAK (tabela 13).

Tabela 13: Lagos e lagoas no Vale de BGR e no Vale de KWAK e capacidade de monitorização através do uso de imagens S2

|  | Vale de BGR                | Vale de KWAK             |
|--|----------------------------|--------------------------|
| Número de lagos e lagoas:                                    | 2 445                      | 999                      |
| Número de lagos e lagoas > 350 m <sup>2</sup> :              | 724 (30%)                  | 109 (11%)                |
| Área total ocupada por lagos e lagoas:                       | 1 887 m <sup>2</sup>       | 394 m <sup>2</sup>       |
| Área total ocupada por lagos e lagoas > 350 m <sup>2</sup> : | 1 610 m <sup>2</sup> (85%) | 288 m <sup>2</sup> (73%) |
| Área total ocupada por lagos e lagoas < 350 m <sup>2</sup> : | 277 m <sup>2</sup> (15%)   | 106 m <sup>2</sup> (27%) |

Por causa da influência das nuvens, dos erros relacionados com a falta de qualidade na georreferenciação e sobreposição dos lagos e lagoas entre imagens dos diferentes sensores (WV 2 e S2), bem como da constatação de potencialidades do S2 diferenciadas em ambas as áreas de verdade de terreno, devido a fatores, internos ou externos, não apurados na sua totalidade no âmbito desta dissertação, procedeu-se à utilização de apenas o Vale de KWAK para a monitorização espectral intra-anual dos lagos e lagoas.

Mediante tratamento, correção das imagens no *Sen2Cor* e garantia de qualidade de georreferenciação entre imagens, organizaram-se tabelas numa base de dados com campos e registos direcionados aos valores



de reflectância de todas as bandas, com resolução de 10 e 20 metros, relativas a cada lago e lagoa e determinados dias de aquisição, em que não se tenha verificado qualquer influência das nuvens sobre a área de teste regional. As datas disponíveis, no período de um ano antes da realização do trabalho de campo são: 17/09/2016, 30/09/2016, 26/11/2016, 29/11/2016, 17/02/2017, 24/02/2017, 16/03/2017, 29/03/2017, 28/05/2017, 07/07/2017, 09/07/2017 e 29/07/2017.

Extraíram-se os valores dos pixéis centrais para todos os lagos e lagoas, considerando-os representativos do seu comportamento espectral, limitando-se assim a influência de coberturas do solo limítrofes na alteração desse comportamento. A base de dados inclui 109 lagos e lagoas com mais de 350 m<sup>2</sup>, sendo que por motivos de tempo, se procedeu à seleção de apenas 6 exemplos para a análise da variabilidade das suas características espectrais. Na base de dados, os lagos e lagoas estão inequivocamente referenciados consoante o seu ID (identificador único) (ID 2 – Lagoa 2, ID 25 – Lagoa 25, ID 40 – Lagoa 40, ID 55 – Lagoa 55, ID 78 – Lagoa 78 e ID 87 – Lagoa 87) (fig. 82).

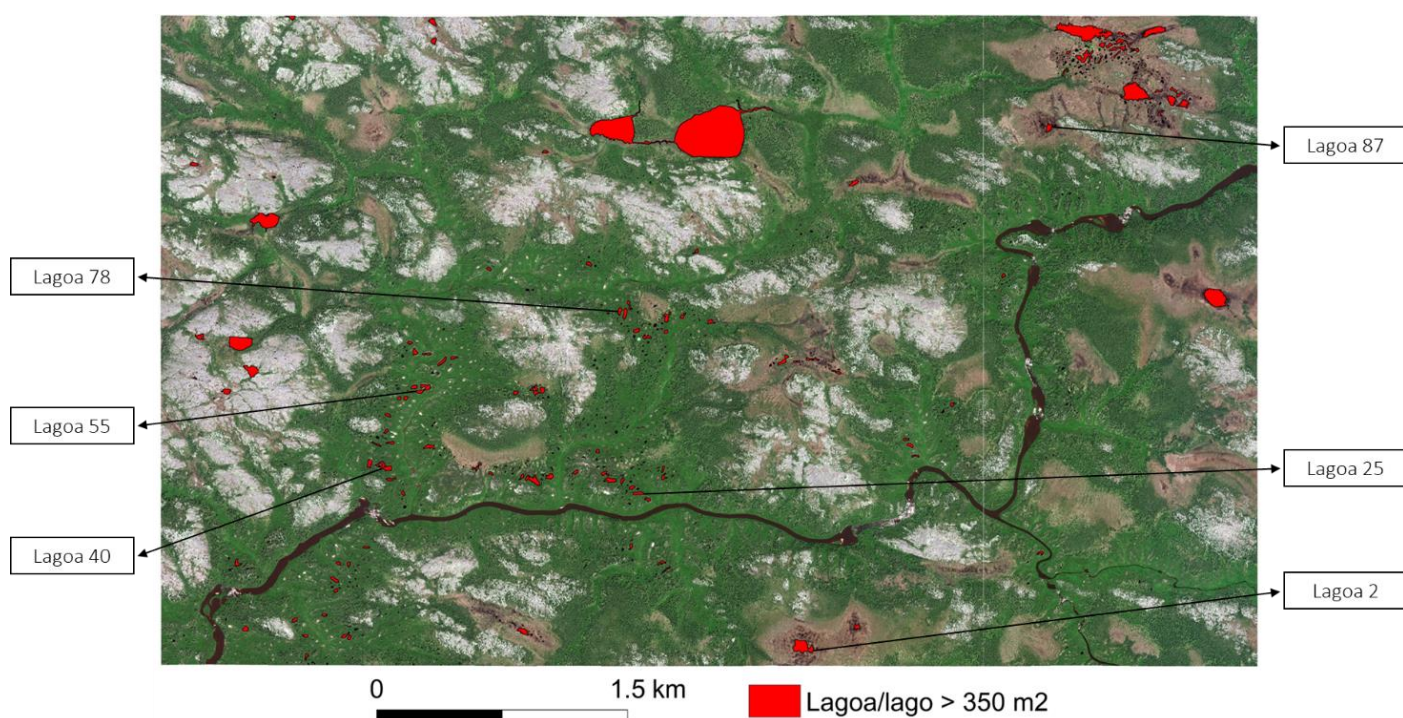


Figura 82: Lagoas do Vale de KWAK com dimensão superior a 350 m<sup>2</sup> utilizadas como exemplo para a monitorização das suas características espectrais intra-anuais ao longo de um ano

A construção da base de dados tornou possível a análise da variação dos valores de reflectância das diferentes bandas para cada lago e lagoa ao longo de um ano (fig. 83). Os dados revelam claramente os diferentes valores de reflectância durante o período de crescimento da vegetação e durante o período com gelo no lago. Estes, são mais elevados durante o período com gelo, uma vez que o gelo e a neve apresentam elevada capacidade de albedo em quase todos os comprimentos de onda. As exceções, referem-se às bandas 11 (1539 – 1681 nm) e 12 (2072 – 2312 nm) do espectro infravermelho de ondas curtas, em que os valores de

reflectância permanecem baixos durante esse período, sofrendo apenas um ligeiro aumento em determinados dias e de forma diferenciada nas lagoas.

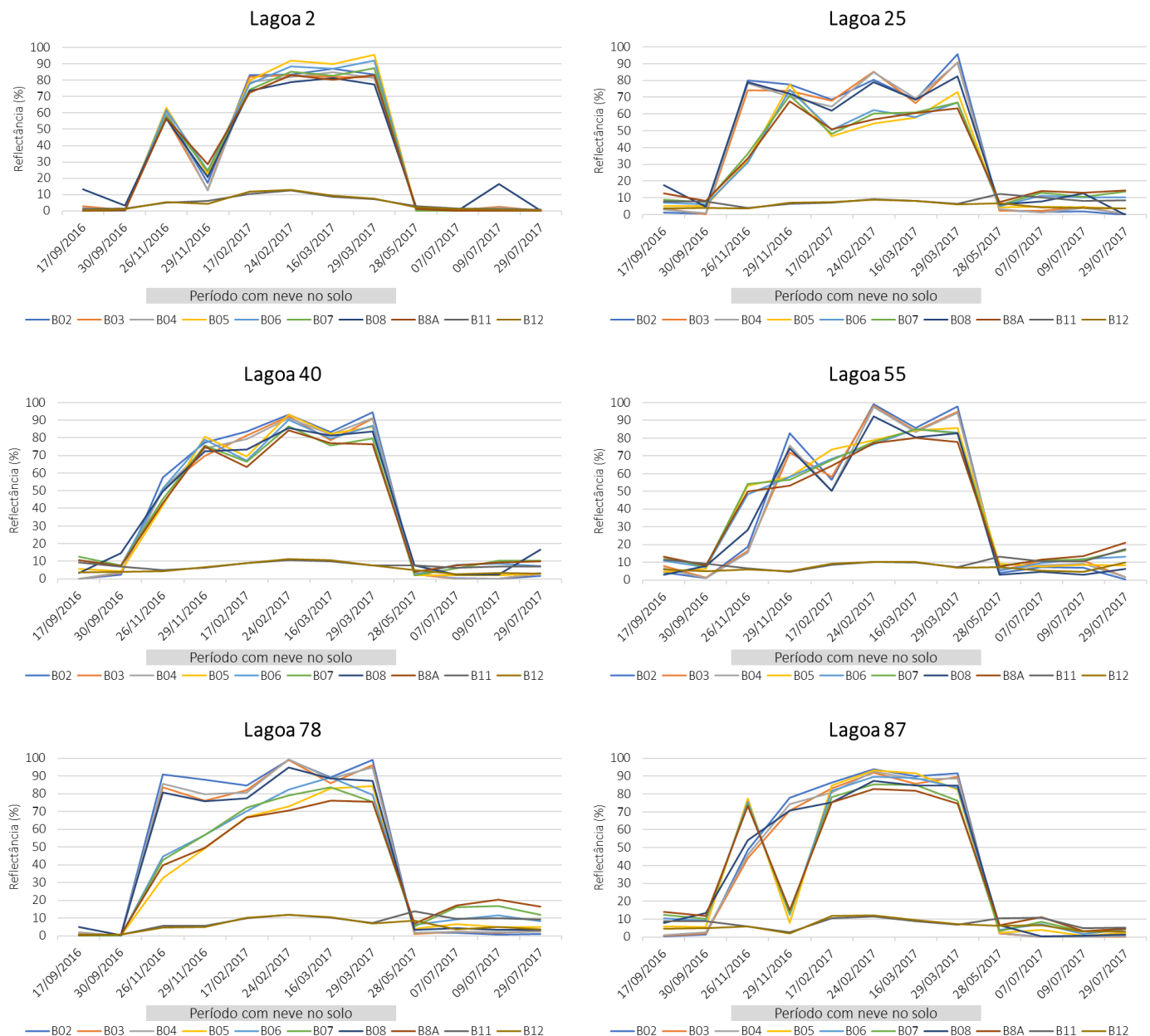


Figura 83: Variação da reflectância nas lagoas selecionadas do Vale de KWAK, entre 17/09/2016 e 29/07/2017, a partir de imagens S2, durante o período de crescimento da vegetação e período com neve no solo

O comportamento espectral dos lagos e lagoas revela-se bastante influenciável pela sazonalidade climática ao longo do ano e respetivas estações (fig. 84). Os compósitos de cor verdadeira dos dias 17/09/2016 e 30/09/2016 representam situações de final de verão (início de outono) sendo que os fundos de vale, ocupados predominantemente por trufeiras, apresentam cor verde clara nesta altura, com especial destaque para a imagem do dia 30/09/2016. Os diferentes tons da vegetação destas áreas, que variam predominantemente entre verdes e castanhos, é resultado das alterações fisiológicas da vegetação a par de mudanças nos fatores abióticos e respetivas condições meteorológicas.



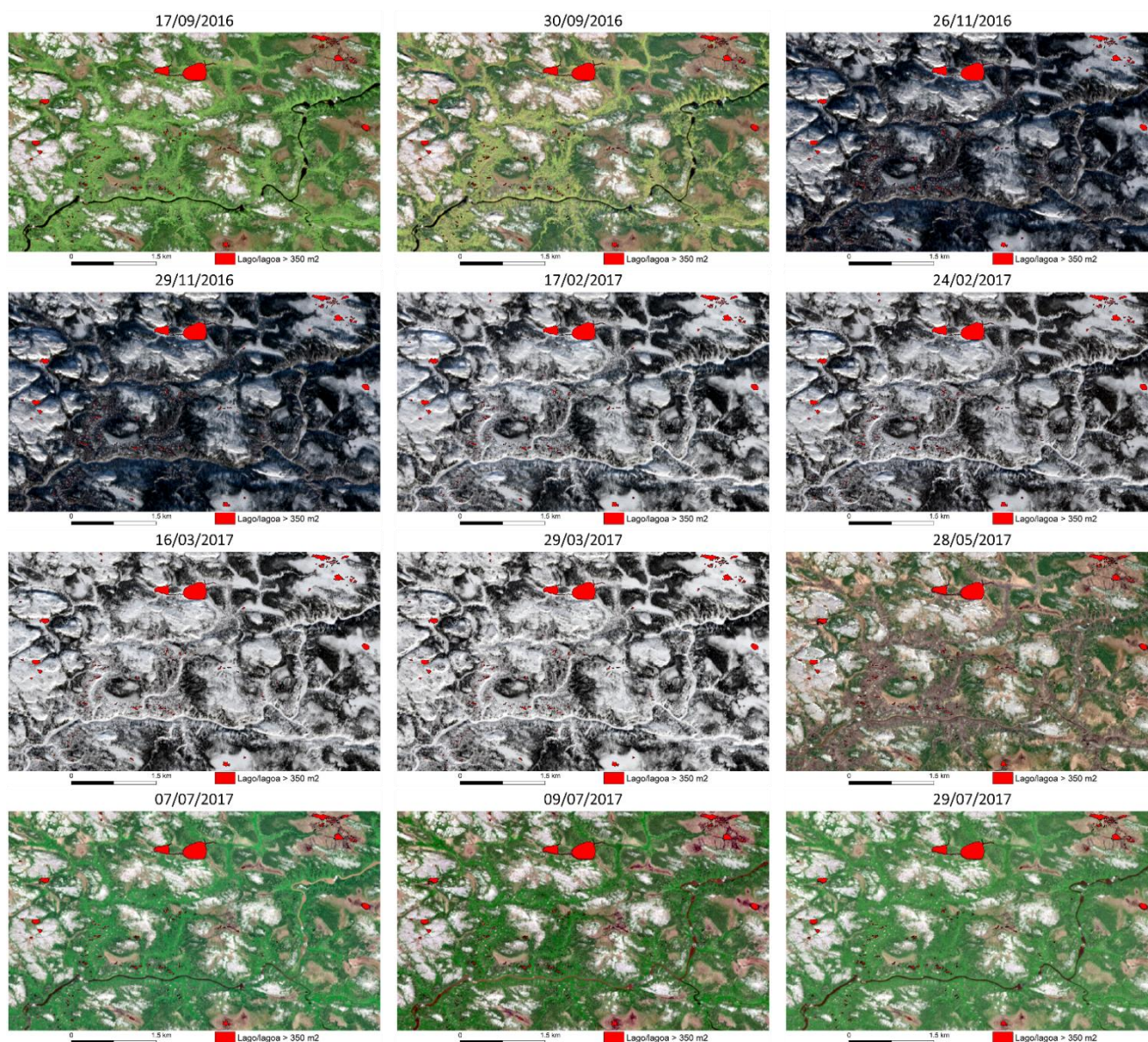


Figura 84: Compósitos de cor verdadeira para o período de um ano antes da realização de trabalho de campo no Vale de KWAK

Entre os dias 26/11/2016 (outono) e 29/03/2017 (inverno) ocorre o período com neve no solo. As imagens dos dias 26/11/2016 e 29/11/2016 representam situações de final de outono, sendo possível observar um coberto de neve sobre a área de teste regional, em geral, menos expressivo comparativamente às imagens relativas aos restantes dias do período com neve no solo, sendo que representam situações durante o inverno (17/02/2017, 24/02/2017, 16/03/2017 e 29/03/2017). Nos dias de outono com neve no solo é possível verificar a existência de pontos com neve nos fundos de vale que se referem essencialmente a lagoas com dimensão inferior a 350 m<sup>2</sup>, onde a neve se acumula, uma vez que, regra geral, estas se encontram rodeadas por uma crista periférica e pela vegetação (efeito tampão). A influência da neve não é um processo linear em todos os lagos e lagoas, devido a fatores topográficos locais, influência do vento e da chuva na sua distribuição, entre outros fatores (Bhiry et al., 2011). Breton et al (2009), Laurion et al (2010) e Bouchard et al (2014) descobriram que as lagoas não congelam em profundidade durante o inverno, sendo que as suas temperaturas são superiores a 0°C, devido essencialmente ao efeito tampão (isolador) da camada de gelo

sobre as lagoas. Breton et al (2009) identificaram ainda que a estratificação térmica das lagoas impõe restrições na circulação de gases, sendo que a primavera deverá ser o período de intensa desgaseificação para a atmosfera, com potencial aumento do fluxos de gases, uma vez que os gases acumulados e produzidos durante o inverno, deverão ser libertados após quebra do gelo. Nesta dissertação, no entanto, dada a utilização de imagens do satélite S2, não se procura estudar a influência da neve sobre as lagoas, uma vez que para esse estudo, a utilização de outro tipo de imagens seria mais eficaz, como por exemplo, provenientes de satélites RADAR com sensores ativos. Assim, procurou-se perceber a variação dos valores de reflectância das bandas fora do período com gelo na lagoa, seleccionando-se apenas essas imagens (fig. 85). Terminado o período de congelação das lagoas, os valores de reflectância das bandas diminuem substancialmente em todas, sem excepção. No dia 28/05/2017 (primavera) a vegetação herbácea e arbustiva das turfeiras encontra-se acastanhada, por se encontrar em fase de recuperação após o inverno. Os dias 7, 9 e 29 de Julho de 2017 correspondem ao início do período estival, em que os fundos de vale apresentam cor verde escura.

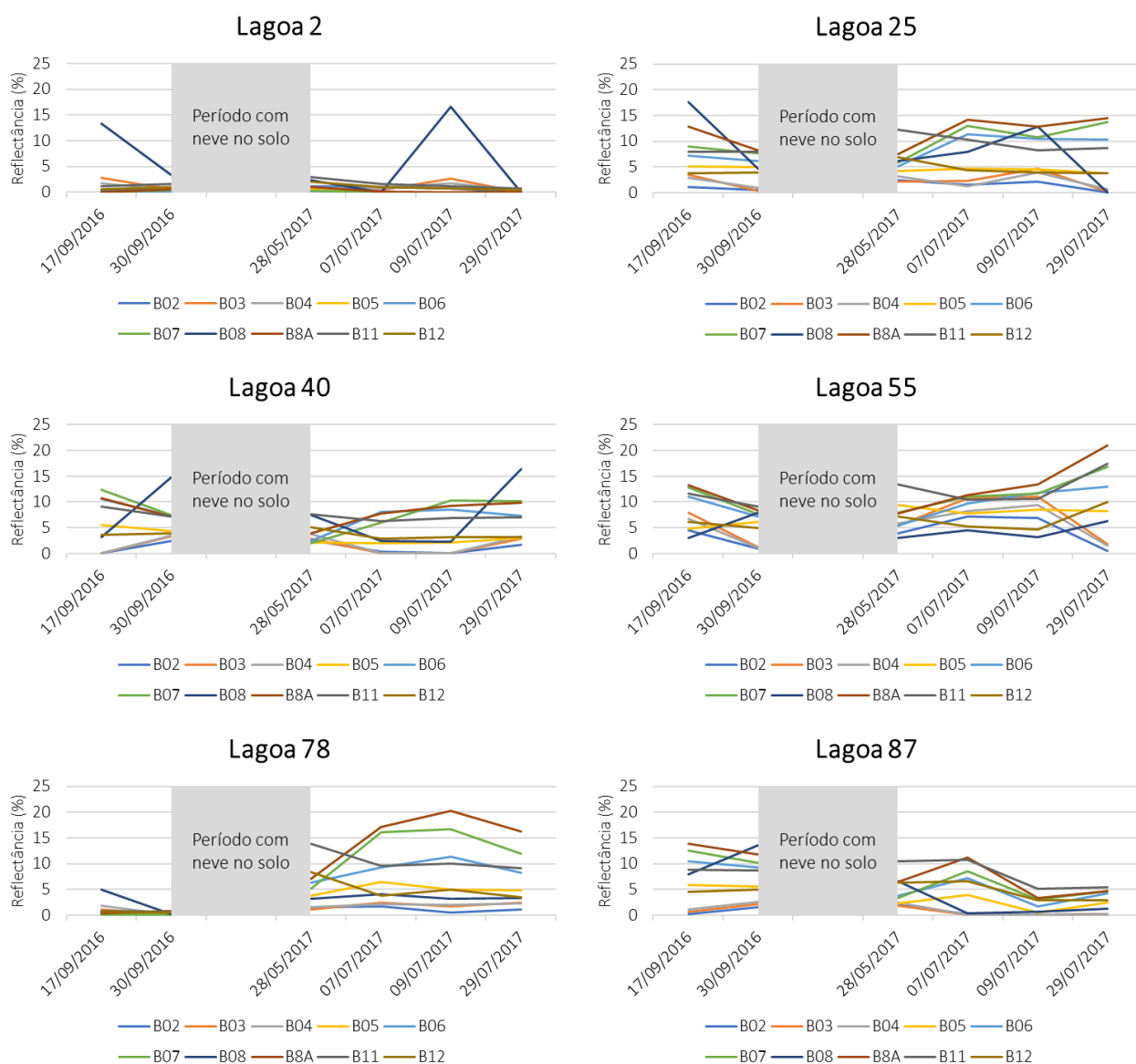


Figura 85: Variação da reflectância na lagoas seleccionadas do Vale de KWAK, entre 17/09/2016 e 28/07/2017 (fora do período com gelo sobre a lagoa), a partir de imagens S2

Por forma a auxiliar a interpretação dos comportamentos espectrais das lagoas utilizadas como exemplo durante a estação de crescimento da vegetação (primavera e verão), procedeu-se à compilação dos compósitos de cor verdadeira das imagens S2, apenas para a áreas das lagoas (fig. 86). A análise dos compósitos de cor verdadeira para a área das lagoas reforça a importância de considerar o pixel central na monitorização das características espectrais das lagoas, uma vez que, é possível verificar, em algumas situações, misturas espectrais introduzidas pela vegetação limítrofe que mergulha para dentro das lagoas termocársicas ao longo de determinadas alturas do ano, estando em parte relacionadas com eventuais oscilações do nível de água no interior das lagoas.

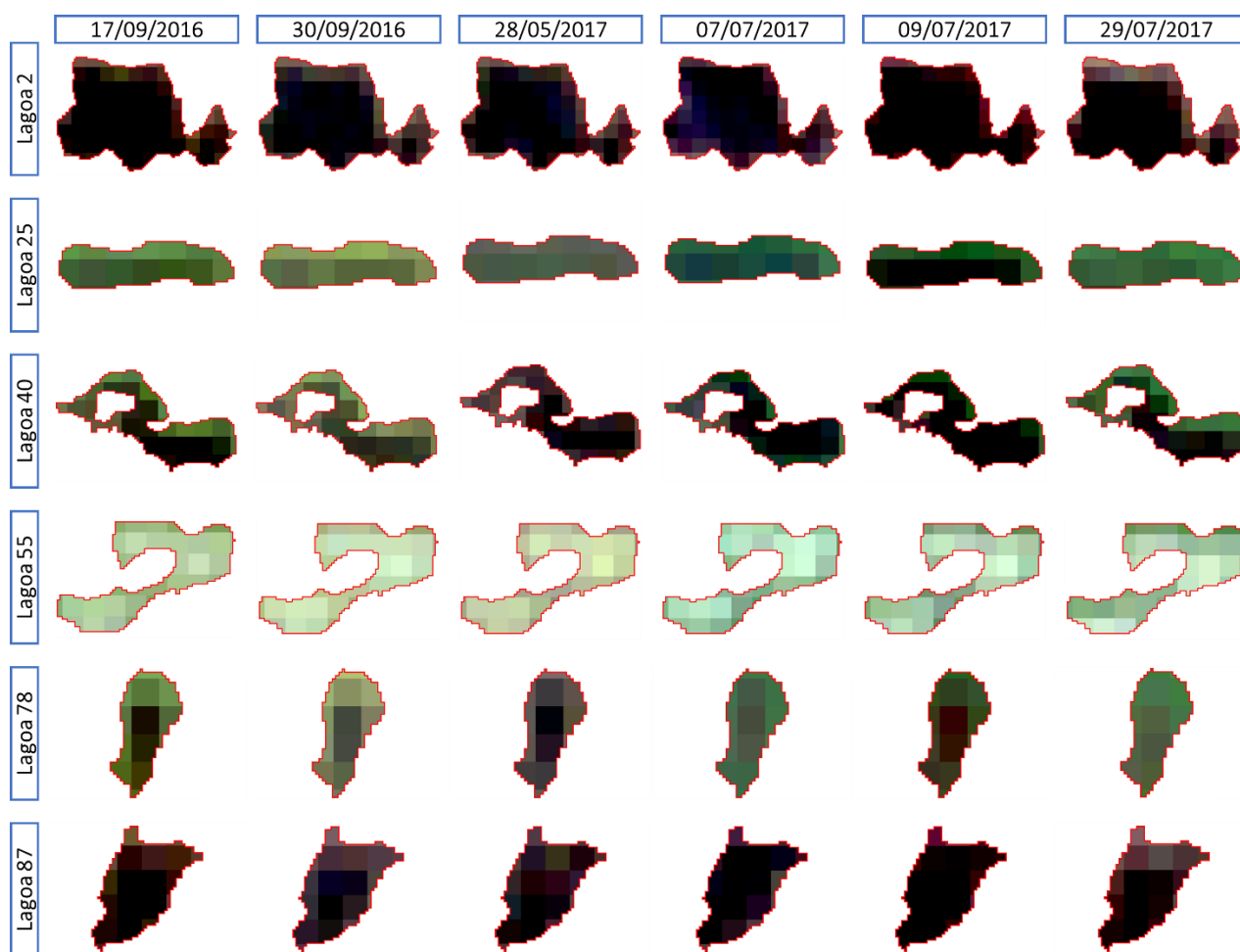


Figura 86: Compósitos de cor verdadeira S2 sobre as lagoas do Vale de KWAK utilizadas como exemplo  
Os limites das lagoas foram obtidos a partir das imagens WV 4

Todas as lagoas, sem exceção, durante o período de crescimento da vegetação registam comportamentos espectrais distintos, sem a verificação de padrões que possam ser comparáveis. A lagoa 2 é a única que apresenta variações apenas na banda 8 (infravermelho próximo), podendo espelhar, por exemplo, um boom de algas em determinadas alturas do ano, com especial destaque para o dia 17/09/2016 e 09/07/2017 (Bégin & Vincent, 2017). Por outro lado, todas as outras lagoas registam alterações nos valores de reflectância de todas as bandas, durante esse mesmo período, de forma diferenciada e mais ou menos



drástica. As alterações nos valores de reflectância das bandas do espectro do visível evidenciam mudanças na cor da água das lagoas ao longo do ano, caso contrário os valores de reflectância dessas bandas seriam constantes e estariam fixos numa determinada percentagem, nos diferentes dias de aquisição das imagens S2. As restantes bandas relativas ao espectro do infravermelho próximo, registam igualmente dinâmicas bastante expressivas e diferenciadas, estando, no entanto, relacionadas com outros fatores, essencialmente fotossintéticos, e não só, que não as alterações nas propriedades óticas das lagoas. Os vários fatores, com incidência nas lagoas, que espelham variações nos valores de reflectância das bandas do espectro do infravermelho e infravermelho de ondas curtas, não são explorados no âmbito desta dissertação.

A análise da variação dos valores de reflectância das bandas requer particular cuidado no dia 28/05/2017, sendo a única situação, fora do período com gelo sobre a lagoa, e durante o período crítico de intensa desgaseificação para a atmosfera, captada pelas imagens S2. A esse nível destaca-se a mudança dos valores de reflectância das bandas, antes e depois do período com gelo sobre a lagoa. Em todas as lagoas registam-se valores de reflectância das bandas diferenciados antes e depois do período com gelo sobre a lagoa. Este facto é mais evidente na lagoa 78, em que os valores de reflectância se alteram drasticamente, com o seu aumento, podendo haver relação com a capacidade de libertação de GEE por parte da mesma, durante o período pós gelo. A variação dos valores de reflectância ocorre de forma mais dinâmica nas bandas do infravermelho próximo (bandas 5, 6, 7, 8 e 8A), comparativamente às bandas do espectro do visível (bandas 2, 3 e 4) e infravermelho de ondas curtas (bandas 11 e 12).

## 6. CONCLUSÃO

As lagoas termocársicas são frequentes no Ártico e Subártico, sendo importantes para o ciclo global do carbono, tendo em consideração, sobretudo, a sua capacidade enquanto libertadoras de CH<sub>4</sub>. Contudo, devido à complexa dinâmica que registam em termos biogeoquímicos, o seu papel enquanto mecanismo de retroação positiva para o aumento da temperatura global, não pode ser generalizado, nem no espaço, nem no tempo (Breton et al., 2009; Laurion et al., 2010). Existem também incertezas quanto à sua representatividade global, fatores que tornam de primordial importância a avaliação de diferentes plataformas de Detecção Remota, a par da definição de abordagens estatísticas adequadas, recorrendo à utilização de Sistemas de Informação Geográfica. Assim, a presente dissertação partiu da definição de uma abordagem metodológica multiescalar, tirando o máximo partido das vantagens do uso de imagens multiespectrais de muito alta resolução (*Sequoia* e *WorldView 2* e *WorldView 4*) para a deteção e delimitação de lagoas termocársicas e de imagens multiespectrais de alta resolução (*Landsat 8* e *Sentinel-2*) para a monitorização das suas características espectrais.

Nas áreas de verdade de terreno, os ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia*, gerados através de *Structure from Motion*, mostraram debilidades relacionadas essencialmente com a dificuldade de construção de algumas superfícies de água de maiores dimensões e com a calibração radiométrica das fotografias aéreas, uma vez que se verificaram faixas sombreadas em determinados ortomosaicos. Estes problemas foram verificados apenas em BGR. Nesta área de estudo, constatou-se a passagem de nuvens e de neblina, aquando da realização do voo. Este fator terá contribuído para a variabilidade das condições de iluminação e para a consequente obtenção desadequada dos dados de verdade de terreno.

Os resultados relativos à identificação do limiar mínimo dimensional relevaram-se distintos em ambas as áreas de verdade de terreno. Ao contrário dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para BGR, nos ortomosaicos de KWAK não se verificou a existência de faixas sombreadas sobre a área de estudo, uma vez que o voo foi realizado sobre condições de céu limpo. O esperado seria a utilização dos mesmos métodos de extração da reflectância e a identificação do mesmo limiar mínimo dimensional em ambas as áreas de estudo, no entanto, tal não se verificou. Para além dos erros associados aos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* para BGR, as diferenças podem ainda ter sido provocadas por outros fatores externos, não apurados no âmbito desta dissertação, como por exemplo a influência do vento na alteração do comportamento espectral das lagoas. Outro fator de primordial importância a ter em consideração, será a influência das sombras projetadas por elementos presentes na superfície terrestre, como as árvores e arbustos, sendo extremamente variáveis nas altas latitudes (devido à baixa altura do Sol) e contribuindo para a mudança do comportamento espectral das lagoas de forma diferenciada ao longo do ano. As sombras projetadas por elementos presentes na superfície terrestre, são ainda descuradas de modelos de correção atmosférica, que têm em consideração Modelos Digitais de Terreno, ao invés de Modelos Digitais de Superfície.

Utilizaram-se diferentes processos para a ortorrectificação, georreferenciação e extração das lagoas termocársicas recorrendo às imagens de muito alta resolução. Estes diferentes processos revelaram algumas limitações sobretudo em BGR, considerando a sua área de verdade de terreno, mas também a sua área de teste regional. Assim, o processo de ortorrectificação das imagens *WorldView 2*, que teve como base um Modelo Digital de Terreno com 50 metros de resolução espacial, e respetiva comparação com as imagens de satélite *Landsat 8* e *Sentinel-2*, revelou limitações na sobreposição dos elementos presentes na superfície terrestre, com especial destaque para as lagoas. Como tal, após a sua ortorrectificação optou-se por executar uma transformação de tipo linear por inspeção visual. No entanto, aquando da comparação dos limites das lagoas extraídos dos ortomosaicos multiespectrais da *Sequoia* com os limites extraídos das imagens *WorldView 2*, verificaram-se erros de sobreposição mais significativos, devido sobretudo a influências topográficas não possíveis de representar nas correções. Essas influências condicionariam a utilização dos limites dimensionais dos lagos e lagoas, para a monitorização das suas características espectrais, no Vale de BGR, usando imagens *Sentinel-2*. Verificaram-se também problemas de deteção de lagoas inferiores a 30 m<sup>2</sup> por parte das imagens *WorldView 2* e *WorldView 4*, em ambas as áreas de estudo. Este facto introduz um erro acrescido às classificações à escala regional, sendo que muitas lagoas de pequena dimensão, poderão ter ficado ocultas aquando da classificação.

O satélite *Sentinel-2* apresentou coeficientes de correlação fortes positivos com os dados de verdade de terreno considerando as lagoas com dimensão superior a 350 m<sup>2</sup>. Tal torna possível a monitorização de cerca de 30% dos lagos e lagoas no Vale de BGR, o que representa 85% da área total ocupada por lagos e lagoas, e 11% dos lagos e lagoas no Vale de KWAK, o que representa 73% da área total ocupada por lagos e lagoas. Tal implica que, muitas dinâmicas espacialmente bastante variáveis ao longo de pequenas áreas, associadas às diferentes características geomorfológicas, biogeoquímicas e limnológicas das lagoas, que terão consequências diretas e diferenciadas na intensificação e sentido dos fluxos de Gases de Efeito de Estufa, não possam ser estudadas recorrendo ao uso de imagens S2. Matveev et al (2016) demonstraram que os fluxos de CH<sub>4</sub> aumentam com a diminuição da área das lagoas termocársicas por estas possuírem, geralmente, colunas de água mais sombrias.

No caso do Vale de BGR, este destaca-se pela existência de 724 lagos e lagoas com dimensão superior a 350 m<sup>2</sup>, o que representa a existência de mais 615 lagos e lagoas do que no Vale de KWAK. O Vale de BGR revela-se assim, mais interessante tendo em consideração o estudo de uma potencial maior diversidade de lagos e lagoas termocársicas. No entanto, em termos morfológicos, ao contrário do Vale de KWAK, em que os lagos e lagoas tendem a ser predominantemente circulares, os lagos e lagoas do Vale de BGR tendem a ser mais alongados, o que pode influenciar de maneira mais significativa a não inclusão na totalidade dos pixels das imagens *Sentinel-2*, o que implica a necessidade de consideração de uma abordagem morfológica mais completa aos lagos e lagoas presentes nesse Vale. Para além disto, outro fator condicionante do estudo dos lagos e lagoas no Vale de BGR tem que ver com a forte influência das nuvens nesta latitude, contaminando de sobremaneira as imagens *Sentinel-2*. Com o melhoramento de 11 dias face aos 16 dias de cobertura global das



imagens *Landsat 8*, os *Sentinel-2* são capazes de oferecer uma cobertura de imagens global em apenas 5 dias, sendo que esse período é ainda mais reduzido nas altas latitudes, tendo sido detetadas imagens de 3 em 3 dias para as áreas de estudo. Apesar desta capacidade de varrimento incrível da superfície terrestre por parte dos satélites *Sentinel-2*, desde junho de 2015 (data de lançamento do satélite) até maio de 2018, constatou-se a existência de apenas 12 imagens não afetadas pelas nuvens, sendo 3 delas fora do período com neve no solo e as restantes 9 no período com neve no solo. As nuvens condicionam de sobremaneira a capacidade de aquisição de dados por parte dos *Sentinel-2* para esta área de teste regional.

O tempo necessário para a aquisição de um mosaico livre de nuvens e com coerência temporal, torna pertinente a utilização de abordagens regionais ao invés de globais (Verpoorter et al., 2014). A detecção de erros de registro entre imagens provenientes do *Sentinel-2A* e do *Sentinel-2B*, só se tornou possível dada a grande escala de trabalho, necessária para o estudo de lagoas termocársicas de tão pequena dimensão. Será, no entanto, igualmente importante perceber quais as consequências inerentes a este erro em plataformas geoespaciais planetárias, geralmente direcionadas a trabalhos de pequena escala e pouco pormenor, como o *Google Earth Engine*.

A presente abordagem metodológica desenvolvida, permite a monitorização de lagoas com dimensão bastante inferior ao limite problemático dos 10 000 m<sup>2</sup>. Assim, o satélite *Sentinel-2* oferecerá dados extremamente importantes para a compreensão do papel das lagoas termocársicas enquanto fontes de Gases de Efeito de Estufa, ao nível, não só temporal, como também espacial. Assim destacam-se essencialmente melhorias introduzidas ao nível da resolução espacial das bandas, bem como ao nível da resolução temporal do sensor, dada a sua capacidade de varrimento da superfície terrestre, o que se traduz numa enorme quantidade de dados, para um determinado local, ao longo do ano, apesar de impactos incontornáveis ao nível da influência das nuvens.

A abordagem metodológica permitiu a avaliação das potencialidades máximas das imagens *Sentinel-2* no âmbito da monitorização, considerando a sua prévia delimitação recorrendo a imagens de muito alta resolução. Será igualmente importante avaliar as potencialidades máximas das imagens *Sentinel-2* no âmbito da detecção de corpos de água, constando se o limiar mínimo dimensional será ou não idêntico aos 350 m<sup>2</sup>. Alguns fatores, que dificultarão a detecção de lagoas termocársicas, serão as heterogeneidades e diferenças espectrais envolvidas, como espelho das suas diferentes características, bem como eventuais misturas espectrais introduzidas por outras coberturas do solo. No entanto, espera-se que a longo prazo, aquando da existência de várias compilações globais de imagens sem influência de nuvens, o satélite *Sentinel-2* seja capaz de melhorar a detecção, caracterização e monitorização de corpos de água a uma escala global.

A contabilização do papel das lagoas termocársicas enquanto fontes de carbono, terá que ser apoiada no futuro, por observações de campo para avaliar parâmetros físico-químicos como a clorofila, a cor da água, a *Colored Dissolved Organic Matter* (CDOM), o DOC e o TSS, à semelhança do estudo realizado por Toming et al (2016). A consequente validação desses dados de verdade de terreno com as imagens de satélite *Sentinel-2*, permitirá ainda apurar quais são os melhores métodos de extração da reflectância, sendo que poderão ser

diferenciados dos explorados nesta dissertação, e distintos consoante a dimensão das lagoas termocársicas envolvidas.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- AMAP. (2017). *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)*. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP).
- Assmann, J., Kerby, J., Cunliffe, A., & Myers-Smith, I. (2018). Vegetation monitoring using multispectral sensors – best practices and 3 lessons learned from high latitudes. *NRC Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 1 - 37.
- Bartsch, A., Widhalm, B., & Obu, J. (2018). *Product documentation: Permafrost extent product*. Austria: Central Institute for Meteorology and Geodynamics.
- Beck, I., Ludwig, R., Bernier, M., Lévesque, E., & Boike, J. (2015). Assessing Permafrost Degradation and Land Cover Changes (1986–2009) using Remote Sensing Data over Umiujaq, Sub-Arctic Québec. *Permafrost and periglacial processes*, 1-13.
- Bégin, P., & Vincent, W. (2017). Permafrost thaw lakes and ponds as habitats for abundant rotifer populations. *Arctic Science*, 354–377.
- Bhiry, N., Delwaide, A., Allard, M., Bégin, Y., Fillion, L., Lavoie, M., Nozais, C., Payette, S., Pienitz, R., Saulnier-Talbot, E., Vincent, W. (2011). Environmental change in the Great Whale River region, Hudson Bay: Five decades of multidisciplinary research by Centre d'études nordiques (CEN). *Écoscience*, 182-203.
- Bouchard, F., Francus, P., Pienitz, R., & Laurion, I. (2011). Sedimentology and geochemistry of thermokarst ponds in discontinuous permafrost, subarctic Quebec, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 1-14.
- Bouchard, F., Francus, P., Pienitz, R., Laurion, I., & Feyte, S. (2014). Subarctic Thermokarst Ponds: Investigating Recent Landscape Evolution and Sediment Dynamics in Thawed Permafrost of Northern Québec (Canada). In I. o. Research, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* (pp. 251-271). Colorado, EUA: University of Colorado.
- Bouchard, F., MacDonald, L., Turner, K., Thienpont, J., Medeiros, A., Biskaborn, B., Korosi, J., Hall, R., Pienitz, R., Wolfe, B. (2016). Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution. *NRC Research Press*, 91-117.
- Breton, J., Vallières, C., & Laurion, I. (2009). Limnological properties of permafrost thaw ponds in northeastern Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1635-1648.
- Brodu, N. (2017). Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Volume: 55, Issue: 8)*, 4610 - 4617.
- Brunn, A., Fischer, C., Dittmann, C., & Richter, R. (2004). Quality Assessment, Atmospheric and Geometric Correction of airborne hyperspectral HyMap Data. *3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy* (pp. 72-81). Herrsching: DLR.
- Dey, V. (2011). *A supervised approach for the estimation of parameters of multiresolution segmentation and its application in building feature extraction from VHR imagery*. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick: New Brunswick, Canada.
- Djoghlaif, A. (2008). Climate Change and Biodiversity in Polar Regions. *Sustainable Development Law & Policy*, 14-16.
- Drăguț, L., Tiede, D., & Levick, S. (2010). ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data. *International Journal of Geographical Information Science*, 859-871.

- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 1-19.
- Dufour-Tremblay, G., Vriendt, L., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2012). The importance of ecological constraints on the control of multi-species treeline dynamics in Eastern Nunavik, Québec. *American Journal of Botany* 99(10), 1638–1646.
- Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L. (2016). The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geoscientific Model Development*, 1647–1672.
- ESA (A). (2018, Julho 25). *Copernicus observing the Earth*. Retrieved from Copernicus: [https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview4](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4)
- ESA (B). (2018, maio 25). *Sentinel-2*. Retrieved from Introducing Sentinel-2: [https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing\\_Sentinel-2](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2)
- Esri Press. (2016). *The ArcGIS Imagery Book*. Redlands, California: Ingram Publisher Services.
- French, H. (2007). *The Periglacial Environment, 3rd Edition*. Southern Gate: John Wiley & Sons, Ltd.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 18-27.
- Government of Canada. (2016). *Canadian Digital Elevation Model Product Specifications*. Quebec: GeoGratis Client Services.
- Government of Canada. (2018, janeiro 4). *Canadian Digital Elevation Model*. Retrieved from Open Government: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/7f245e4d-76c2-4caa-951a-45d1d2051333>
- Grannas, A., Bogdal, C., Hageman, K., Halsall, C., Harner, T., Hung, H., Kallenborn, R., Klán, P., Klánová, J., Macdonald, R., Meyer, T., Wania, F. (2013). The role of the global cryosphere in the fate of organic contaminants. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3271–3305.
- Hachem, S., Allard, M., & Duguay, C. (2009). Using the MODIS Land Surface Temperature Product for Mapping Permafrost: An Application to Northern Québec and Labrador, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* (20), 407–416.
- Huiping, H., Bingfang, W., & Jinlong, F. (2003). Analysis to the relationship of classification accuracy, segmentation scale, image resolution. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toulouse, France: IEEE.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jawak, S., Kulkarni, K., & Luis, A. (2015). A Review on Extraction of Lakes from Remotely Sensed Optical Satellite Data with a Special Focus on Cryospheric Lakes. *Advances in Remote Sensing*, 196-213.
- Karlsson, J., Lyon, S., & Destouni, G. (2014). Temporal Behavior of Lake Size-Distribution in a Thawing Permafrost Landscape in Northwestern Siberia. *Remote Sensing*, 621-636.
- Kavzoglu, T., & Yildiz, M. (2014). Parameter-Based Performance Analysis of Object-Based Image Analysis Using Aerial and Quikbird-2 Images. In F. Sunar, O. Altan, & M. Taberner, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (pp. 31 - 37). Istanbul, Turkey: ISPRS Technical Commission VII Symposium.

- Kokelj, S., & Jorgenson, M. (2013). Advances in Thermokarst Research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 108 - 119.
- Krishnan, A., & Rakshmi, C. (2015). Comparative Study on Pansharpening Methods for Satellite Images. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2615-2620.
- Laurion, I., Vincent, W., MacIntyre, S., Retamal, L., Dupont, C., Francus, P., & Pienitz, R. (2010). Variability in greenhouse gas emissions from permafrost thaw ponds. In ASLO, *Limnology and Oceanography* (pp. 115-113). Québec, Canada: American Society of Limnology and Oceanography.
- Lehner, B., & Doll, P. (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 1-22.
- Lindgren, P., Grosse, G., Anthony, K., & Meyer, F. (2016). Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using high-resolution optical aerial imagery. *Biogeosciences*, 27-44.
- Louis, J., Devignot, O., & Pessiot, L. (2017). *L2A Product Definition Document*. ESA.
- Matveev, A., Laurion, I., Deshpande, B., Bhiry, N., & Vincent, W. (2016). High methane emissions from thermokarst lakes in subarctic peatlands. *Limnology and Oceanography*, S150–S164.
- May, V. (2011). *Using in-field and remote sensing data to monitor permafrost dynamics in Northern Quebec*. Planegg, Alemanha: Universität München.
- McManus, K., Morton, D., Masek, J., Wang, D., Sexton, J., Nagol, J., Ropars, P., Boudreau, S. (2012). Satellite - based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biology*, 2313–2323.
- Moigne, J., Netanyahu, N., & Eastman, R. (2018). *Image Registration for Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Muster, S., Heim, B., Abnizova, A., & Boike, J. (2013). Water Body Distributions Across Scales: A Remote Sensing Based Comparison of Three Arctic Tundra Wetlands. *Remote Sensing*, 1498-1523.
- Muster, S., Roth, K., Langer, M., Lange, S., Aleina, F., Bartsch, A., Morgenstern, A., Grosse, G., Jones, B., Sannel, A., Sjöberg, Y., Günther, F., Andresen, C., Veremeeva, A., Lindgren, P., Bouchard, F., Lara, M., Fortier, D., Charbonneau, S., Virtanen, T., Hugelius, G., Palmtag, J., Siewert, M., Riley, W., Koven, C., Boike, J. (2017). PeRL: a circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake database. *Earth System Science Data*, 317–348.
- Overland, J., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S., Walsh, J., Wang, M., Bhatt, U., Thoman, R. (2015). Surface Air Temperature. *Arctic Report 2015*, 11-16.
- Paradis, M., Mercier, C., & Boudreau, S. (2014). Response of *Betula glandulosa* seedlings to simulated increases in nutrient availability, temperature and precipitation in a lichen woodland at the forest–tundra ecotone. *Plant Ecol*, 305–314.
- Parrot Sequoia. (2016). *User Guide*. Paris: Drones Parrot SAS.
- Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M., & Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters*, 1-4.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature - International journal of science*, 418–422.
- Perovich, D., Meier, W., Tschudi, M., Farrell, S., Gerland, S., & Hendricks, S. (2015). Sea ice. *Arctic Report Card 2015*, 40-33.



- Pix4D. (2017). *Pix4Dmapper 4.0 User Manual*. Lausanne: Pix4D SA.
- Pix4D. (2018, março 11). *Pix4D Support*. Retrieved from Radiometric Calibration Target: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/206494883-Radiometric-Calibration-Target>
- Polishchuk, Y., Bryksina, N., & Polishchuk, V. (2015). Remote Analysis of Changes in the Number of Small Thermokarst Lakes and Their Distribution with Respect to Their Sizes in the Cryolithozone of Western Siberia. *Atmospheric and Oceanic Physics Vol. 51, No. 9*, 999–1006.
- Przytulska, A., Comte, J., Crevecoeur, S., Lovejoy, C., Laurion, I., & Vincent, W. (2015). Phototrophic pigment diversity and picophytoplankton abundance in permafrost thaw lakes. *Biogeosciences Discuss.*, 12, 12121–12156.
- Richter, R., Louis, J., & Berthelot, B. (2011). *Sentinel-2 MSI – Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), VEGA Technologies SAS.
- Ropars, P., & Boudreau, S. (2012). Shrub expansion at the forest–tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 1-9.
- senseFly. (2017). *eMotion 3 User Manual*. Cheseaux-Lausanne, Switzerland: senseFly SA.
- Serreze, M., Barrett, A., Stroeve, J., Kindig, D., & Holland, M. (2009). The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, 11–19.
- Singh, R., Singh, K., Maisnam, M., & P, J. (2018). Antarctic sea ice extent from ISRO's SCATSAT-1 2 using PCA and an unsupervised classification. *The 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing (ECRS 2018)* (pp. 1-13). Greece: Journal Remote Sensing.
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K., Lenney, M., & Macomber, S. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75:230–244.
- Tian, B., Li, Z., Zhang, M., Huang, L., Qiu, Y., Li, Z., & Tang, P. (2017). Mapping Thermokarst Lakes on the Qinghai–Tibet Plateau Using Nonlocal Active Contours in Chinese GaoFen-2 Multispectral Imagery. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, VOL. 10, NO. 5, 1687 - 1700.
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., & Nöges, T. (2016). First Experiences in Mapping LakeWater Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing*, 1-14.
- Tremblay, B., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2012). Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik. *Environmental Research Letters*, 1-11.
- Trimble. (2014). *eCognition Developer 9.0 Reference Book*. Munich: Trimble Germany GmbH.
- USGS (A). (2017). *Product Guide - Landsat 8 Surface Reflectance code (LASRC) product*. Middleton: Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- USGS (B). (2017). *Earth resources observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) on demand interface*. Middleton: Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- USGS. (2018, março 28). *Landsat Surface Reflectance Level-2 Science Products*. Retrieved from USGS - Landsat Missions: <https://landsat.usgs.gov/landsat-surface-reflectance-data-products>
- Vallée, S., & Payette, S. (2007). Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Québec). *Geomorphology* 90 , 162–170.

- Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D., & Tranvik, L. (2014). A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 6396–6402.
- Vincent, W. (2009). Effects of Climate Change on Lakes. *Elsevier*, 55-60.
- Watanabe, S., Laurion, I., Chokmani, K., Pienitz, R., & Vincent, W. (2011). Optical diversity of thaw ponds in discontinuous permafrost: A model system for water color analysis. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 116, G02003, 1-17.
- World Wildlife Fund. (2018, julho 1). *Conservation Science Data and Tools*. Retrieved from Global Lakes and Wetlands Database: <https://www.worldwildlife.org/pages/global-lakes-and-wetlands-database>
- Yan, L., Roy, D., Zhang, H., Li, J., & Huang, H. (2016). An Automated Approach for Sub-Pixel Registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) Imagery. *Remote Sensing*, 1 - 23.
- Zitová, B., & Flusser, J. (2003). Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 977–1000.



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: O efeito de amplificação do Ártico – tendências na temperatura média do ar na superfície durante o período de 1960 a 2011 (NASA – Goddard Institute for Space Studies) .....  | 11 |
| Figura 2: Mínimo de cobertura de gelo marinho do Ártico em situação de final de verão em 1980 e 2007 (Copernicus Brief – Monitoring Climate Change in the Arctic, 2013) .....   | 12 |
| Figura 3: Distribuição das diferentes zonas de <i>permafrost</i> no Hemisfério Norte e Hemisfério Sul (International Permafrost Association – Brown et al., 1997).....  | 13 |
| Figura 4: Temperatura média anual do solo em regiões com <i>permafrost</i> no Hemisfério Norte (2000 – 2016) (Bartsch et al., 2018).....  | 16 |
| Figura 5: <i>Palsas</i> em estado de degradação (subsidência local parcial) num dos locais de monitorização de longo prazo do Centro de Estudos Nórdicos, na zona de <i>permafrost</i> descontínuo do Subártico Canadiano (SAS – 55°13'N; 77°42'O) .....  | 17 |
| Figura 6: Estágios de degradação de uma <i>palsa</i> ou <i>lithalsa</i> : A – <i>Palsa/lithalsa</i> antes do início da degradação, B e C – Fusão das lentes de gelo de segregação, resultando em subsidência da superfície e acumulação de água em depressões, D – Lagoa termocársicas cercada por uma crista periférica, ocorrendo a sua estabilização, caso o substrato seja composto por silte e argila impermeáveis (Adaptado de Bouchard et al., 2016) ..... | 19 |
| Figura 7: Lagoas termocársicas em SAS (A – 55°13'N; 77°42'O) e em KWAK (B – 55°19'N; 77°30'O), podendo, nesta última, verificar-se o fenómeno de arbustização com <i>Betula glandulosa</i> , <i>Alnus crispa</i> e <i>Salix planifolia</i> .....  | 20 |
| Figura 8: Pântanos globais da base de dados da GLWD (nível 3), com a distribuição latitudinal e longitudinal das áreas pantanosas e comparação com outros modelos globais até ao final do século XX (Lehner & Doll, 2004).....  | 25 |
| Figura 9: Distribuição e mudanças dos corpos de água na superfície terrestre, (A) considerando a máxima extensão de água, ocorrência permanente e sazonal de outubro de 2014 a outubro de 2015 e (B) perdas e ganhos em superfícies de água permanentes e sazonais entre 1984 e 2015 (Pekel et al., 2016) .....   | 27 |
| Figura 10: Localização das áreas de estudo BGR e KWAK no Subártico Canadiano a Norte do Quebec (ArcGis Online World Imagery).....   | 29 |
| Figura 11: Zona de transição tundra-floresta sobre rochas graníticas e gnaisses esculpidos pelos glaciares há 8 000 anos (Kuujuarapik – Umiujaq) .....  | 30 |
| Figura 12: Dados de precipitação da estação meteorológica de Inukjuak (58°N) e dados de temperatura das estações meteorológicas de Inukjuak e Kuujuarapik (55°N) de 1940 a 2003 (Adaptado de Payette et al., 2004) .....  | 31 |
| Figura 13: Enquadramento da área de verdade de terreno (BGR) na área de teste regional (Vale de BGR) num compósito de cor verdadeira de imagens <i>WorldView 2</i> (11/09/2017) .....   | 32 |
| Figura 14: Enquadramento da área de verdade de terreno (KWAK) na área de teste regional (Vale de KWAK) num compósito de cor verdadeira de imagens <i>WorldView 4</i> (29/07/2017) .....   | 33 |
| Figura 15: Áreas de trabalho complementares (área de verdade de terreno e área de teste regional) e sensores utilizados.....  | 36 |
| Figura 16: Metodologia para a avaliação da qualidade das imagens de satélite e monitorização das mudanças espectrais nas lagoas termocársicas .....   | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 17: VANT utilizado para o trabalho de campo com câmara multiespectral <i>Sequoia</i> e respetivo sensor de irradiância .....   | 38 |
| Figura 18: Exemplos de fotografias obtidas com a câmara multiespectral <i>Sequoia</i> sobre o alvo de calibração (A – verde, B – vermelho, C – limite do vermelho e D – infravermelho próximo).....   | 39 |
| Figura 19: Percursos realizados pelo VANT durante os quatro voos em BGR (A) e os dois voos em KWAK (B) 40   |    |
| Figura 20: Fases de processamento dos modelos no <i>Pix4Dmapper</i> e <i>outputs</i> esperados (Adaptado de <i>Pix4D</i> , 2017).....   | 42 |
| Figura 21: Resultados do processamento da primeira e segunda fase do modelo no <i>Pix4Dmapper</i> em BGR (A) e em KWAK (B) .....  | 43 |
| Figura 22: Exemplos de fotografias utilizadas no projeto multiespectral e no projeto de cor verdadeira.....   | 44 |
| Figura 23: Erros de reflectância relacionados com a introdução de faixas sombreadas nos ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> provocados pela influência de sombras de nuvens (bandas do vermelho).....                                    | 45 |
| Figura 24: Exemplos de alguns erros (caixas vermelhas) nas áreas das lagoas gerados durante a construção dos ortomosaicos da <i>Sequoia</i> no <i>Pix4Dmapper</i> (bandas do vermelho).....   | 45 |
| Figura 25: Sobreposição de fotografias no projeto multiespectral mais completo de BGR (A) e de KWAK (B) 46  |    |
| Figura 26: Ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> para a área de verdade de terreno de BGR (A – verde, B – vermelho, C – limite do vermelho, D – infravermelho próximo e E – compósito de cor verdadeira) .....                             | 46 |
| Figura 27: Ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> para a área de verdade de terreno de KWAK (A – verde, B – vermelho, C – limite do vermelho, D – infravermelho próximo e E – compósito de cor verdadeira) .....                            | 47 |
| Figura 28: Exemplos da influência das sombras (setas a vermelho) e da vegetação aquática (setas a amarelo) nas lagoas termocársicas de KWAK (bandas do vermelho).....   | 48 |
| Figura 29: Fases, métodos, índices e técnicas utilizadas para a delimitação das lagoas nas áreas de verdade de terreno (BGR e KWAK) .....   | 49 |
| Figura 30: Cenários de segmentação derivados a partir do parâmetro de escala utilizados na abordagem <i>straightforward</i> (KWAK).....   | 53 |
| Figura 31: Melhor ajuste do parâmetro forma <i>versus</i> melhor ajuste do parâmetro compacidade (melhor tentativa geral), num cenário de extrema segmentação (parâmetro de escala fixo no valor 5) na abordagem <i>straightforward</i> (KWAK)..... | 53 |
| Figura 32: Exemplos de erros mais frequentes derivados da segmentação multiresolução através da abordagem <i>straightforward</i> em KWAK (banda do vermelho) .....  | 54 |
| Figura 33: Perfis de reflectância das bandas da câmara <i>Parrot Sequoia</i> e dos índices de NDVI e NDWI em superfícies.....   | 55 |
| Figura 34: Exemplo da seleção de corpos de água prováveis através do limiar de NDWI em BGR (A) e KWAK (B) .....   | 56 |
| Figura 35: Erros de comissão e omissão derivados do limiar de NDWI em BGR (A) e KWAK (B) .....  | 57 |
| Figura 36: Resultados da aplicação e tratamento da classificação não supervisionada <i>clustering K-means</i> na área de verdade de terreno de KWAK .....   | 58 |
| Figura 37: Enquadramento das áreas de verdade de terreno (A – BGR e B – KWAK) nas áreas de teste regional (A – Vale de BGR) e (B – Vale de KWAK) .....  | 59 |
| Figura 38: Fases, métodos e índices para a delimitação dos lagos e lagoas nas áreas de teste regional (Vale de BGR e de KWAK).....  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 39: Fase 1 – Segmentação através do algoritmo multiresolução no Vale de BGR .....  | 61 |
| Figura 40: Fase 1 – Segmentação através do algoritmo multiresolução no Vale de KWAK .....   | 62 |
| Figura 41: Classificação dos segmentos suscetíveis de serem corpos de água com limiar de NDWI e segmentos eliminados com limiar de Brightness no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B) .....  | 62 |
| Figura 42: Tratamento por fotointerpretação e fusão de segmentos relativos a todos os corpos de água no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B) .....   | 63 |
| Figura 43: Cursos de água originados a partir do MDT (Government of Canada, 2018) para eliminação de polígonos relativos a cursos de água no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B).....   | 64 |
| Figura 44: Lagos e lagoas no Vale de BGR (A) e no Vale de KWAK (B) .....  | 64 |
| Figura 45: O espectro eletromagnético (Esri Press, 2016) .....  | 65 |
| Figura 46: Exemplo da classificação automática da cena através do <i>Sen2Cor</i> numa coleção de imagens S2 (fase 1 do processamento) .....   | 69 |
| Figura 47: Exemplo de erro de registo entre as imagens dos satélites S2-A e S2-B – A: Compósito de cor verdadeira do satélite S2-A de 23/08/2017; B: compósito de cor verdadeira do satélite S2-B de 29/07/2017 .....   | 71 |
| Figura 48: Contacto entre duas imagens dos satélites S2-A de 07/07/2017 (esquerda) e S2-A de 21/06/2017 (direita) .....   | 71 |
| Figura 49: Métodos utilizados para a extração dos valores de reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (dados de verdade de terreno) e das imagens de satélite L8 e S2 .....  | 72 |
| Figura 50: M1 S – Estatística zonal para obtenção do valor médio considerando todos os pixéis presentes nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS) .....                                      | 73 |
| Figura 51: M2 S – Estatística zonal para obtenção do valor médio considerando todos os pixéis presentes num círculo central com 20% da área, nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS) ..... | 74 |
| Figura 52: M1 L8/S2 – Estatística zonal para obtenção do valor médio de todos os pixéis intersectados nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS) .....  | 75 |
| Figura 53: M2 L8/S2 – Valor de um único pixel com maior área e mais central presente nas lagoas completas (azul – LC), nas áreas sem sombra (amarelo – SS) e nas áreas com sombra (vermelho – CS) .....   | 76 |
| Figura 54: Lagoas termocársicas em BGR (A) e em KWAK (B) num compósito de ortomosaicos de muito alta resolução da câmara multiespectral <i>Sequoia</i> (Banda Vermelho: vermelho; Banda Verde: verde; Banda Azul: infravermelho próximo) .....                  | 82 |
| Figura 55: Distribuição por classes de área das lagoas de BGR e KWAK .....  | 83 |
| Figura 56: Distribuição por classes e clusters de assimetria das lagoas de BGR e KWAK (valores menores representam maior simetria e valores maiores representam assimetria) .....   | 84 |
| Figura 57: <i>Clusters</i> de assimetria das lagoas de BGR (A) e KWAK (B) .....   | 84 |
| Figura 58: Exemplos de valores de índice de forma e implicações nas fronteiras dos objetos .....  | 85 |
| Figura 59: Distribuição por classes de índice de forma (menor – suave; maior – irregular) das lagoas de BGR e KWAK .....  | 85 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 60: Distribuição por classes de ajuste retangular (0 – inexistente; 1 – completo) das lagoas de BGR e KWAK .....  | 86  |
| Figura 61: Distribuição por classes de ajuste elíptico (0 – inexistente; 1 – completo) das lagoas de BGR e KWAK .....  | 86  |
| Figura 62: Distribuição por classes de densidade (menor – filamento; maior – quadrado) das lagoas de BGR e KWAK .....  | 87  |
| Figura 63: Direção principal das lagoas de BGR (A) e KWAK (B).....   | 87  |
| Figura 64: Reflectância nas bandas espectrais do verde, vermelho, limite do vermelho e infravermelho próximo nas lagoas de BGR; Método de extração da reflectância: M2 S; Método de classificação do conjunto de dados: Quebras naturais com 5 classes.....  | 88  |
| Figura 65: Reflectância nas bandas espectrais do verde, vermelho, limite do vermelho e infravermelho próximo nas lagoas de KWAK; Método de extração da reflectância: M2 S; Método de classificação do conjunto de dados: Quebras naturais com 5 classes..... | 89  |
| Figura 66: Melhores métodos de extração da reflectância em BGR para o S2 (M1 S versus M2 S2).....  | 91  |
| Figura 67: Melhores métodos de extração da reflectância em BGR para o L8 (M1 S versus M2 L8).....  | 91  |
| Figura 68: Melhores métodos de extração da reflectância em KWAK para o S2 (M2 S versus M1 S2).....   | 94  |
| Figura 69: Melhores métodos de extração da reflectância em KWAK para o L8 (M2 S versus M1 L8).....   | 94  |
| Figura 70: Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (R) por área das lagoas termocársicas em BGR entre os ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (M1 S) e as imagens de satélite L8 (M2 L8).....   | 95  |
| Figura 71: Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (R) por área das lagoas termocársicas em BGR entre os ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (M1 S) e as imagens de satélite S2 (M2 S2) .....  | 96  |
| Figura 72: Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (R) por área das lagoas termocársicas em KWAK entre os ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (M2 S) e imagens de satélite L8 (M1 L8) .....  | 97  |
| Figura 73: Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (R) por área das lagoas termocársicas em KWAK entre os ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (M2 S) e imagens de satélite S2 (M1 S2).....   | 98  |
| Figura 74: Lagos e lagoas no Vale de BGR (A) e de KWAK (B) .....   | 99  |
| Figura 75: Distribuição por classes de área dos lagos e lagoas no Vale de BGR e de KWAK .....  | 100 |
| Figura 76: Métricas e índices de forma para os lagos e lagoas das áreas de verdade de terreno (ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> – gráficos a azul) e das áreas de teste regional (imagens WV2 e WV4 – gráficos a verde).....                   | 101 |
| Figura 77: Lagoas delimitadas tendo como base os ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (dados de verdade de terreno) e as imagens de muito alta resolução WV 2 (dados de teste regional) para BGR.....  | 104 |
| Figura 78: Lagoas delimitadas tendo como base os ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (dados de verdade de terreno) e as imagens de muito alta resolução WV 4 (dados de teste regional) para KWAK.....   | 105 |
| Figura 79: Comparação da base de dados <i>Global Lakes and Wetlands Database</i> (GLWD) com a base de dados produzida através do tratamento e classificação de imagens WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional   | 106 |
| Figura 80: Comparação da base de dados <i>Global Surface Water Explorer</i> (GSWE) com a base de dados produzida através do tratamento e classificação de imagens WV 2 e WV 4 para as áreas de teste regional  | 107 |
| Figura 81: Lagos e lagoas com dimensão inferior e superior a 350 m <sup>2</sup> , limiar que possibilita a sua monitorização com imagens S2 na área de teste regional do Vale de BGR (A) e do Vale de KWAK (B).....  | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 82: Lagoas do Vale de KWAK com dimensão superior a 350 m <sup>2</sup> utilizadas como exemplo para a monitorização das suas características espectrais intra-anuais ao longo de um ano .....                 | 109 |
| Figura 83: Variação da reflectância nas lagoas seleccionadas do Vale de KWAK, entre 17/09/2016 e 29/07/2017, a partir de imagens S2, durante o período de crescimento da vegetação e período com neve no solo ..... | 110 |
| Figura 84: Compósitos de cor verdadeira para o período de um ano antes da realização de trabalho de campo no Vale de KWAK .....   | 111 |
| Figura 85: Variação da reflectância na lagoas seleccionadas do Vale de KWAK, entre 17/09/2016 e 28/07/2017 (fora do período com gelo sobre a lagoa), a partir de imagens S2 .....                                   | 112 |
| Figura 86: Compósitos de cor verdadeira S2 sobre as lagoas do Vale de KWAK utilizadas como exemplo ...  | 113 |



## INDÍCE DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1: Extensão de áreas terrestres com <i>permafrost</i> no Hemisfério Norte (Adaptado de French, 2007) ..  | 14  |
| Tabela 2: Banda, valor máximo e mínimo da banda e sua largura (nanometros – nm) da câmara multiespectral <i>Sequoia</i> .....   | 39  |
| Tabela 3: Erros de comissão e omissão após o estabelecimento do limiar de NDWI .....  | 56  |
| Tabela 4: Contabilização da área e percentagem de área nos diferentes passos utilizados para a classificação dos segmentos .....  | 63  |
| Tabela 5: Bandas de Reflectância de Superfície do satélite <i>Landsat 8</i> (L8) do sensor OLI ( <i>Operational Land Imager</i> ) .....   | 67  |
| Tabela 6: Bandas de Atmosfera Inferior do sensor do satélite <i>Sentinel-2</i> (S2) .....   | 69  |
| Tabela 7: Correspondência das bandas da câmara multiespectral <i>Sequoia</i> com as bandas <i>Landsat 8</i> (L8) e <i>Sentinel-2</i> (S2) .....   | 78  |
| Tabela 8: Parâmetros de configuração do plugin <i>Super-resolution</i> do programa SNAP da Agência Espacial Europeia (ESA) .....  | 79  |
| Tabela 9: Medidas estatísticas da área das lagoas em BGR e em KWAK.....   | 83  |
| Tabela 10: Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (R) relativos à comparação entre os dois métodos de extração dos valores de reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (dados de verdade de terreno) com os dois métodos de extração da reflectância das imagens de satélite L8 e S2 nas lagoas completas (LC) de BGR ( <b>negrito e sublinhado</b> = correlações não significativas com valor de $p > 0,05$ ; <b>negrito</b> = correlações não significativas com valor de $p > 0,01$ ) .....   | 90  |
| Tabela 11: Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (R) relativos à comparação entre os dois métodos de extração dos valores de reflectância dos ortomosaicos multiespectrais da <i>Sequoia</i> (dados de verdade de terreno) com os dois métodos de extração da reflectância das imagens de satélite L8 e S2, nas áreas com sombra (S), áreas sem sombra (SS) e lagoas completas (LC) de KWAK ( <b>negrito e sublinhado</b> = correlações não significativas com valor de $p > 0,05$ ; <b>negrito</b> = correlações não significativas com valor de $p > 0,01$ ) ..... | 92  |
| Tabela 12: Medidas estatísticas da área dos lagos e lagoas presentes no Vale de BGR e no Vale de KWAK .   | 100 |
| Tabela 13: Lagos e lagoas no Vale de BGR e no Vale de KWAK e capacidade de monitorização através do uso de imagens S2 .....   | 108 |